



**Daniel Alexandre de  
Pina Alves**

**Sequestro e Armazenamento de CO<sub>2</sub> – Aplicação da  
tecnologia em Portugal**



**Daniel Alexandre de  
Pina Alves**

**Sequestro e Armazenamento de CO<sub>2</sub> – Aplicação da  
tecnologia em Portugal**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Isabel Miranda, Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

## **o júri**

presidente

**Prof. Dr. Casimiro Adrião Pio**

professor catedrático do departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr.<sup>a</sup>. Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda**

professora associada do departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro  
(Orientadora)

**Prof. Dr. Manuel Joaquim Sabeça Feliciano**

professor equiparado a assistente na Escola Superior Agrária de Bragança do Instituto Politécnico de Bragança

## **agradecimentos**

Para a elaboração deste trabalho foi importante a disponibilidade sempre demonstrada pela Unidade Termoelétrica de Sines. É, pois, essencial agradecer o especial contributo do Eng. António Mano.

**palavras-chave**

Dióxido de carbono, sequestro, armazenamento, termoelétrica, Portugal, carvão

**resumo**

O presente trabalho visa analisar as várias opções para o sequestro do CO<sub>2</sub> presente nos combustíveis fósseis, podendo isso acontecer antes ou depois da sua suja queima. São também analisadas as possibilidades existentes para o seu armazenamento definitivo, a nível geológico e oceânico ou a utilização do CO<sub>2</sub> em processos industriais. Avaliam-se depois as principais fontes fixas de Portugal e o seu potencial para a aplicação desta tecnologia.

**keywords**

Carbon dioxid, sequestration, storage, thermoelectric, Portugal, coal.

**abstract**

This work intent to analyze the existing options for the CO<sub>2</sub> sequestration from the fossil fuels. That can occur before its burning or after it.  
Will also be analyzed the possibilities for the CO<sub>2</sub> storage in geologic formations, in the ocean or its usage in industrial processes.  
For the main Portuguese CO<sub>2</sub> sources will also be evaluated the potential for the installation of the capture and storage technologies.

## Índice

1. Introdução .....	1
2. Possibilidades para o Sequestro do CO <sub>2</sub> .....	9
2.1. Pré-combustão .....	10
2.2. Pós-combustão .....	13
2.2.1. Absorventes químicos (líquidos).....	15
2.2.2. Adsorventes (sólidos).....	17
2.3. Membranas selectivas.....	20
2.4. Liquefacção do gás .....	22
2.5. Oxi-combustíveis.....	23
2.6. Processos industriais .....	24
3. Transporte .....	27
4. Possibilidades para o armazenamento de CO <sub>2</sub> .....	31
4.1. Armazenamento geológico .....	32
4.2. Mineralização e aplicações do CO <sub>2</sub> na indústria .....	36
4.3. Armazenamento em oceano.....	37
5. Aplicação do Sequestro e Armazenamento de CO <sub>2</sub> em Portugal.....	39
6. Conclusão .....	49
7. Bibliografia .....	55
8. Anexos.....	57

## 1. Introdução

A evolução que a sociedade viveu no último século, a nível científico, económico e social, supera em muitos aspectos os cenários mais optimistas. É surpreendente não só constatar a grande evolução ocorrida, como é ainda mais incrível a rapidez com que isso tem acontecido.

Este “boom” evolucionar iniciado com a revolução industrial, assenta num crescente consumo de energia, que irá continuar a aumentar nas próximas décadas de forma massiva. Em Portugal por exemplo, entre 2000 e 2007 o consumo energético do Sistema Eléctrico Nacional evoluiu de forma quase linear com um crescimento aproximado de 32% [URL 1].

Uma vez que as principais fontes de energia são, e têm sido os combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e o gás natural, a sua utilização tem originado imensas quantidades de gases de efeito estufa.

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principal responsável pelo aumento do efeito estufa, desempenha também um papel fulcral na manutenção da existência de vida na Terra. Na proporção correcta estabiliza a temperatura evitando gradientes de temperatura extremos como se verifica em planetas sem uma atmosfera completa.

O problema reside no facto de que a concentração deste gás na atmosfera no período pré-industrial era cerca de 275 partes por milhão (ppm), enquanto que hoje é de cerca de 380 ppm e com garantia de continuar a aumentar.

Como demonstrado recentemente no (*Working Group I* (WG1) do Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC)) [Le Treut *et al*, 2007], o actual Aquecimento Global é resultado da actividade antropogénicas, e resulta maioritariamente da queima de combustíveis fósseis que conduzem à emissão de gases como CO<sub>2</sub>, monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e compostos orgânicos voláteis, representando o CO<sub>2</sub> a maior fatia, e sendo por isso o principal gás responsável pela actual situação.



Na Figura 1 pode observar-se a evolução da temperatura em vários pontos do globo durante o ultimo século. São apresentados três tipos de dados distintos, medições efectuadas ao longo do século, resultados de modelos numéricos tendo em conta apenas contribuições naturais, e resultados de modelos que consideram também as emissões de origem humana. A consistência dos modelos utilizados para as previsões futuras é evidente, assim como a clara tendência de aumento da temperatura consequência da acção antropogénica.

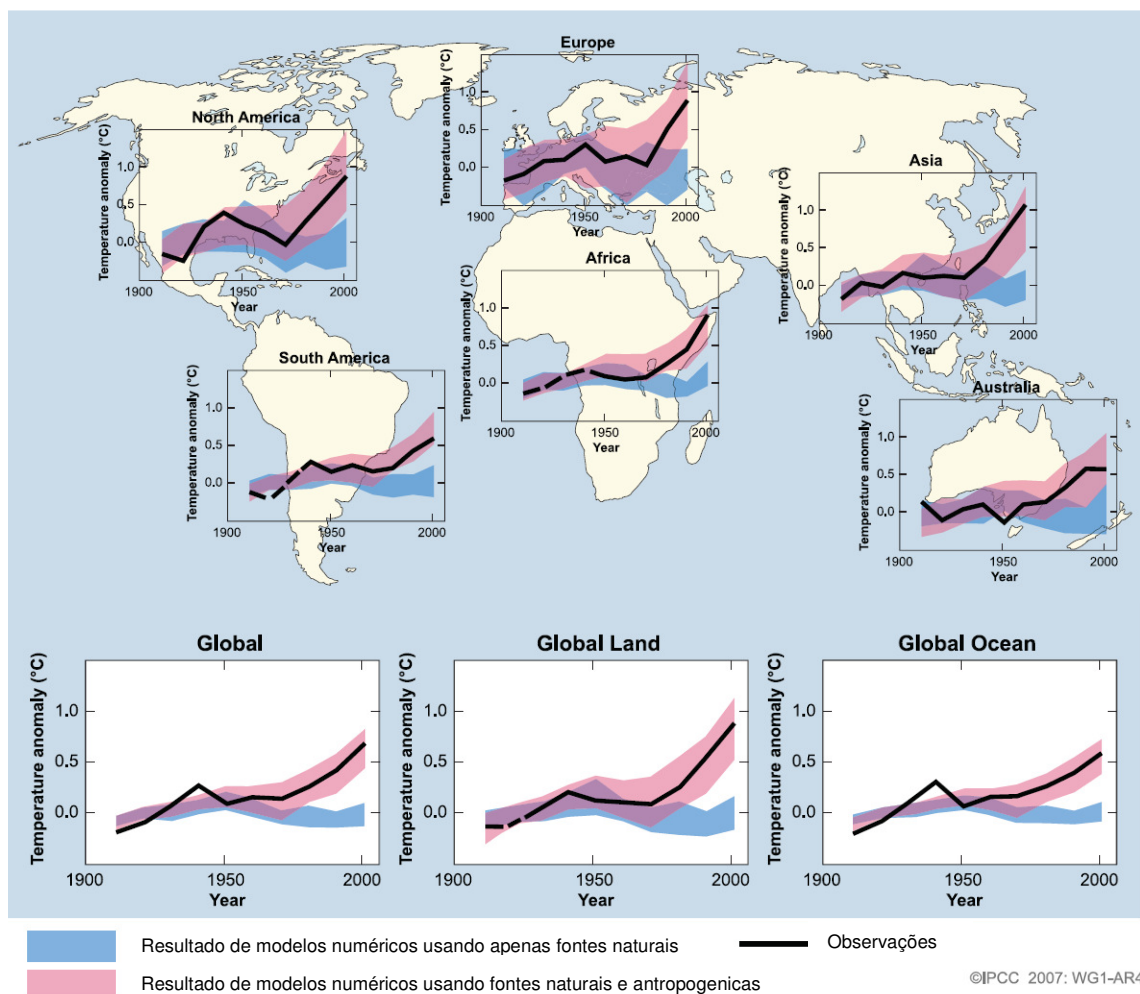


Figura 1 – Comparação dos resultados de modelos numéricos e de observações da evolução da temperatura em vários pontos do globo [IPCC, 2005]

Apesar do cenário alertado pelo IPCC apontar para um panorama muito problemático, a situação real pode ser ainda mais gravosa [Hansen et al, 2007]. Por exemplo, o relatório do WG1 do IPCC aponta uma subida do nível do mar de cerca de 40 cm neste

século. Contudo, essa subida poderá para o mesmo período atingir alguns metros [Hansen et al, 2007].

A magnitude e o custo dos problemas resultantes da amplificação do efeito estufa natural da atmosfera, que origina as alterações climáticas e todas as consequências associadas, foram estimados no relatório conhecido como "Relatório Stern" [Stern, 2006].

Baseado em modelos económicos, é analisado o custo do aquecimento global e são apontadas as Alterações Climáticas como "a maior e mais abrangente falha de mercado jamais vista". Se os países nada fizerem e continuarem o mesmo caminho, o PIB poderá ser afectado de 5 a 20 % [Stern, 2006], o que à escala global representa uma quantia de 7 triliões de dólares.

A ordem de grandeza dos prejuízos que poderemos enfrentar mantendo o "Business-as-usual" só é comparável aos custos enfrentados com as Guerras Mundiais [Stern, 2006].

Para alterar a actual situação, e em 2050 serem atingidos níveis aceitáveis de emissões de gases de efeito estufa, o investimento de 1% do PIB mundial durante os próximos anos, seria suficiente [Stern, 2006].

As causas das alterações climáticas estão identificadas, as consequências são também cada vez mais visíveis e os caminhos para as soluções estão a ser desenvolvidos todos os dias.

Enfrentar desde já o problema e reduzir a intensidade de carbono da economia é crucial, reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> associadas às actividades humanas representará em termos meramente económicos, um ganho líquido superior a 2,5 mil milhões de dólares [Stern, 2006]

O caminho para resolver este problema implica a coordenação de um vasto portfólio de tecnologias assim como o desenvolvimento de novas formas de produção e armazenamento de energia que não impliquem a emissão de gases de efeito estufa.

É altamente improvável que qualquer uma das tecnologias hoje conhecidas se desenvolva o suficiente, de forma a por si só, fazer frente às necessidades de redução de emissões dado o vasto leque de actividades consumidoras de energia e o facto de que todas as tecnologias apresentam constrangimentos específicos. Por outro lado, é ainda prematuro apostar qual das tecnologias tornará economicamente mais viável.

A redução efectiva das emissões atmosféricas em 5,2% em relação aos valores de 1990, como previsto no Protocolo de Kyoto, apenas aparenta ser possível com o incremento de todas as tecnologias disponíveis. Aumento da eficiência no consumo da energia produzida, aumento do uso de tecnologias renováveis, produção de energia nuclear, evolução das actuais centrais de carvão para centrais com tecnologia avançada, Sequestro e Armazenamento de CO<sub>2</sub> (SAC) de forma considerada definitiva [Specker, 2007].

A Figura 2 ilustra o potencial das várias tecnologias para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> tendo por base as estimativas de aumento de emissões previstas até 2030. As metas definidas, apesar de ambiciosas, são tecnologicamente viáveis.

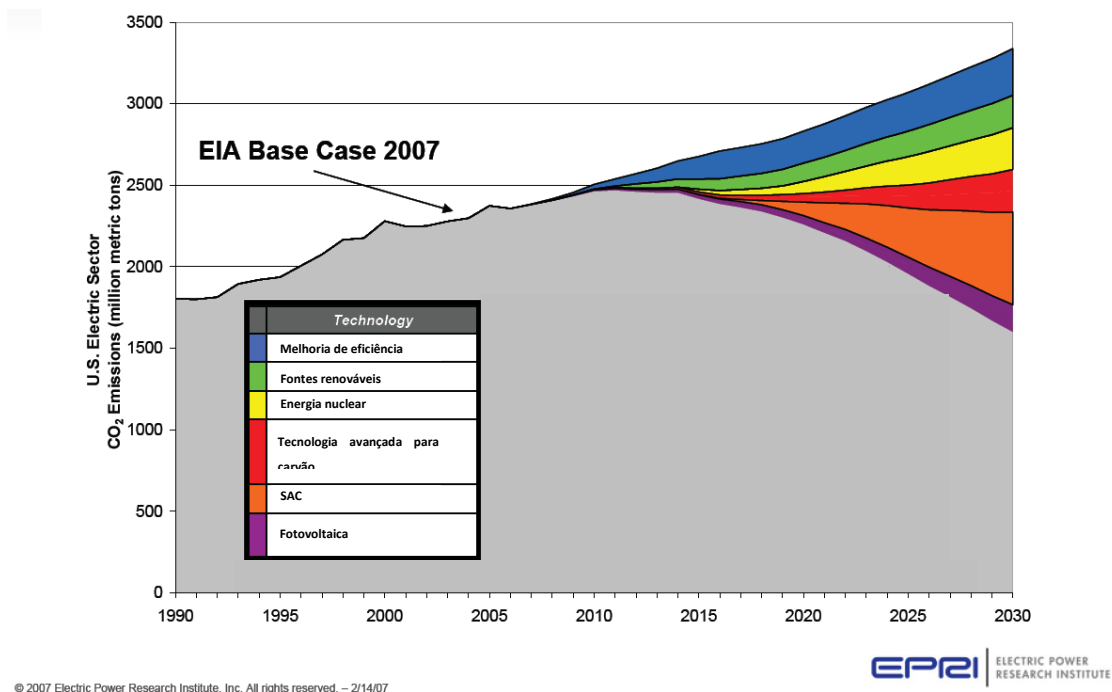


Figura 2 - Potencial tecnológico para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>

Neste conjunto de tecnologias, o Sequestro e Armazenamento de carbono (SAC) surge de forma mais ou menos inesperada visto que, ao contrário dos conceitos estabelecidos, de que os combustíveis fósseis são a principal fonte do problema, esta tecnologia aponta um caminho onde essas fontes de energia podem ser usada sem prejudicar o ambiente, e permitindo o continuo desenvolvimento social e económico.

A apoiar o SAC está o facto de que a actual economia assenta basicamente em energia de origem fóssil, como o petróleo e o carvão. Apesar de todos os problemas associados, as tecnologias que recorrem a esses combustíveis têm sofrido grandes desenvolvimentos no sentido de se tornarem mais eficientes e competitivas, além de estarem fortemente implementadas por todo o mundo.

Países com grandes reservas de carvão, como a Índia, China Austrália, Estados Unidos da América e Polónia, usam actualmente esta matéria para a produção de energia eléctrica, prevendo-se que assim continue, e em alguns países aumente significativamente nos próximos anos. Estes factos são altamente preocupantes, dado o grande crescimento económico esperado para estes mercados, aliado ao facto de este tipo de produção de energia ser poluente.

Como se mostra na Figura 3, em 2005, do consumo global de energia primária, 1/4 foi carvão. Isto traduz-se em cerca de 38,4% das emissões de CO<sub>2</sub>.

Na Figura 4, pode observar-se a distribuição das fontes de energia para a geração de electricidade, constatando-se que, de toda a energia eléctrica produzida, 40% resultou da queima de carvão [URL 2].

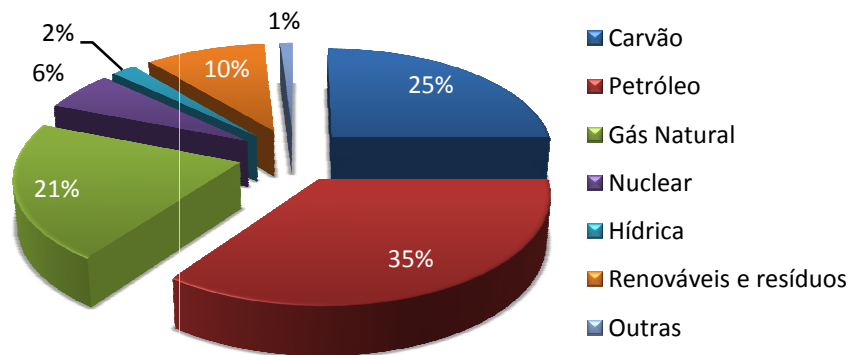


Figura 3 - Consumo mundial de energia primária (2005) [URL 2]

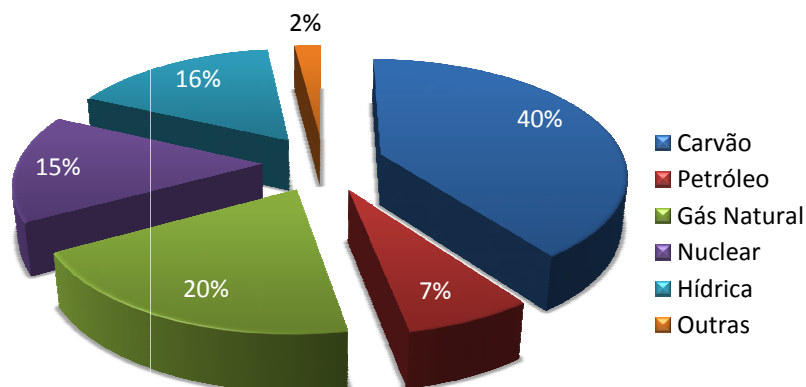


Figura 4 - Fontes de energia para a geração de electricidade mundial (2005) [URL 2]

Com um cenário "business as usual", mantendo as condições de hoje, as emissões de CO<sub>2</sub> da responsabilidade do carvão vão quase duplicar para valores de 19 Gton em 2030, e em 2050, para valores de 32 Gton [Katzner *et al*, 2007]. Isto significa que em 2050 a concentração de CO<sub>2</sub> excederá em quase 8 vezes o limite para um aumento da temperatura global inferior a 2°C.

Vislumbra-se assim um cenário favorável ao enquadramento do SAC, ainda que deverá implicando um forte investimento no desenvolvimento e na implementação desta tecnologia.

Com este trabalho pretende-se analisar as várias etapas do SAC: possibilidades para o sequestro de CO<sub>2</sub> (capítulo 2); processos de transporte (capítulo 3) e possibilidades para o seu armazenamento (capítulo 4). Será depois (capítulo 5) avaliado o potencial da aplicação desta tecnologia em Portugal.

É fundamental reforçar que esta tecnologia, por si só, não tem capacidade para fazer frente à gravidade da situação actual e que outras tecnologias devem continuar a ser desenvolvidas e implementadas.

Por outro lado, esta tecnologia, apesar de minimizar de forma importante as emissões de CO<sub>2</sub>, mantém a actual dependência da Humanidade dos combustíveis de origem fósil.



## 2. Possibilidades para o Sequestro do CO<sub>2</sub>

O Sequestro de CO<sub>2</sub> é o processo que tem como objectivo impedir que o CO<sub>2</sub> presente nos combustíveis fósseis seja libertado para a atmosfera. Para isso, esse CO<sub>2</sub> deverá ser isolado e posteriormente armazenado de forma definitiva.

Esse isolamento pode ser conseguido por três processos distintos para além dos processos industriais, (Figura 5) e permite concentrar esse gás para posterior transporte até ao seu local de armazenamento final.

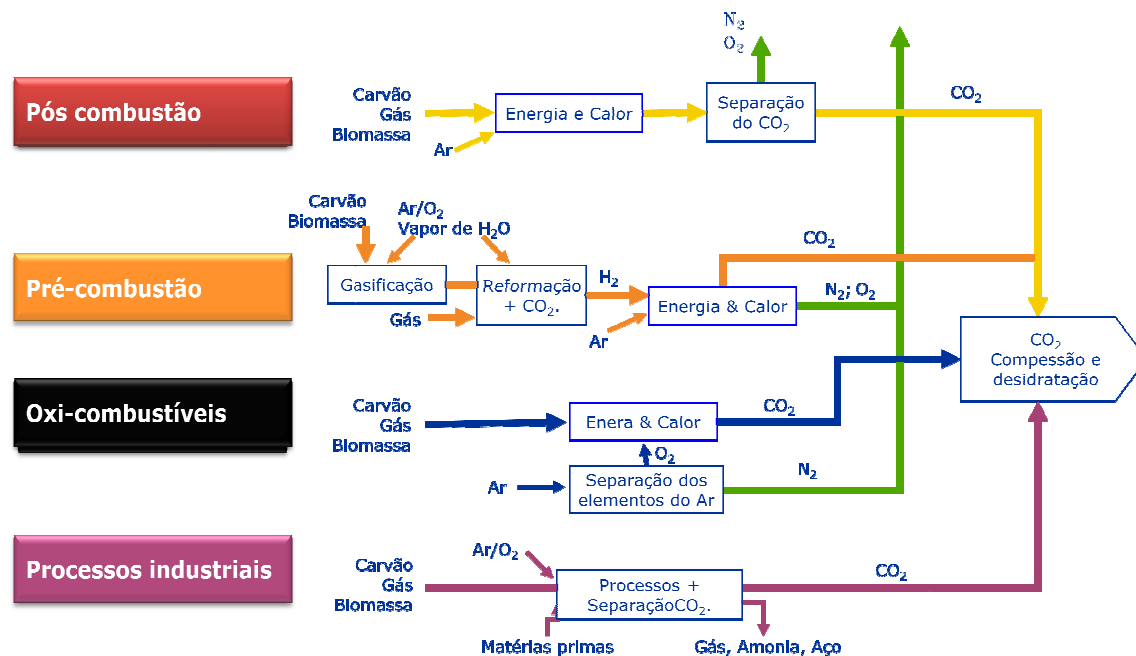


Figura 5 – Processos possíveis para o sequestro de CO<sub>2</sub>

As actuais tecnologias de sequestro de CO<sub>2</sub> apenas se adequam à separação deste gás em grandes fontes industriais, como as cimenteiras, centrais de gás natural ou grandes centrais de produção de energia, onde se inserem as grandes centrais termoelétricas alimentadas por combustíveis fósseis ou mesmo por biomassa. Os actuais processos não apresentam viabilidade para fontes de pequena dimensão como edifícios habitacionais ou comerciais, ou fontes móveis como os automóveis. Nestes casos, e com a actual tecnologia seria extremamente complexo e dispendioso capturar o CO<sub>2</sub> produzido. A alternativa para evitar as emissões nos casos referidos é usar energia que



não origine CO<sub>2</sub> na sua queima, como o H<sub>2</sub> ou electricidade produzida em centrais de emissões reduzidas, equipadas com SAC, ou através das energias renováveis.

A captura do CO<sub>2</sub> presente no ar atmosférico também não é considerada com estas tecnologias. Isto porque a concentração média de CO<sub>2</sub> no ar ambiente é actualmente de 380 ppm, cerca de 100 vezes inferior as concentrações encontradas nos efluentes gasosos das unidades apontadas como apropriadas para utilização de SAC. Esse facto faz com que a utilização de tecnologias de SAC para a captura de CO<sub>2</sub> atmosférico não seja economicamente viável, quando comparada com o desenvolvimento de biomassa para essa remoção, biomassa que pode posteriormente ser utilizada como combustível numa central equipada com SAC apresentando dessa forma uma melhor relação custo-benefício. Este procedimento permite uma remoção efectiva do CO<sub>2</sub> actual.

Do ponto de vista ambiental a utilização do SAC em centrais de queima de biomassa é sem dúvida muito vantajosa, uma vez que propicia uma efectiva remoção de CO<sub>2</sub> do actual ciclo de carbono. Estas unidades teriam não emissões zero, como outras centrais de queima de combustíveis fósseis, mas sim emissões “negativas”.

Os processos actualmente considerados para a captura de CO<sub>2</sub> com aplicação na tipologia de unidades já referida são: sistemas de “pré-combustão”, “pós-combustão”, preparação de oxi-combustíveis, membranas selectivas e liquefacção do gás. [Metz, *et al.*, 2005].

Nos processos industriais onde é necessária a remoção do CO<sub>2</sub>, muitas vezes recorre-se á combinação de duas ou mesmo das três técnicas.

Cada um dos processos apresenta características próprias. Assim, são factores determinantes para a escolha do tipo de captura, características como a concentração de CO<sub>2</sub> resultante na câmara de combustão, a sua pressão e a sua temperatura.

### 2.1. Pré-combustão

O processo de pré-combustão para o sequestro do CO<sub>2</sub> pode ser dividido em vários blocos. Numa fase inicial, a partir do combustível fóssil cria-se uma mistura constituída basicamente por CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Numa outra fase é removido o CO<sub>2</sub> aí presente, Figura 6.

Para a concretização de cada um destes dois blocos do processo podem ser seguidos vários processos, tendo sempre o mesmo objectivo, sequestrar o CO<sub>2</sub> presente no combustível fóssil.

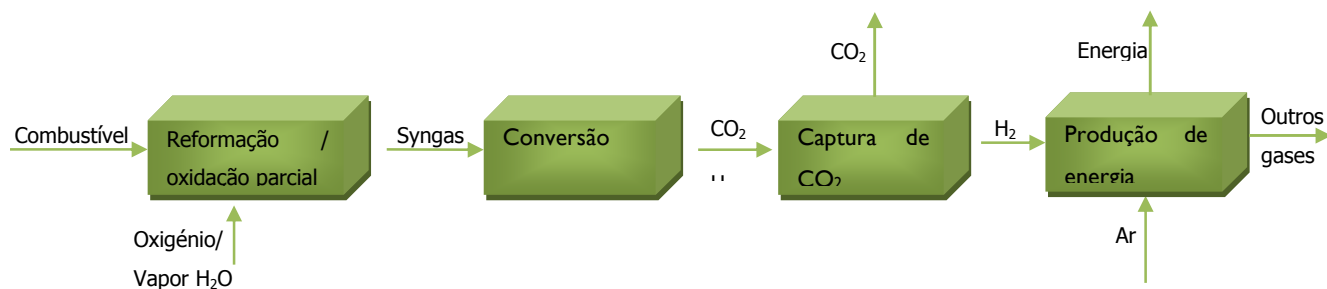
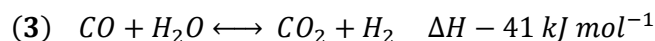
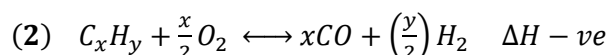
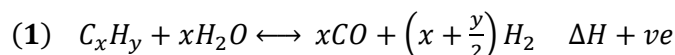


Figura 6 – Esquema do processo de pré-combustão para a captura de CO<sub>2</sub>

Regra geral a remoção de CO<sub>2</sub> por este processo implica a produção de uma mistura gasosa de carbono e hidrogénio, resultante do combustível primário, (gás de síntese) denominada "syngas". O combustível fóssil pode ser sólido, líquido ou gasoso ou mesmo biomassa.

Esta mistura, syngas, pode ser obtida por duas vias. Através da adição ao combustível primário vapor de água ou de oxigénio a elevadas pressões, (tipicamente entre 20 e 28 bar). O processo de adição de vapor de água (reação 1) é denominado "steam reforming". Essa primeira reação (1), é endotérmica e ocorre com um catalisador a altas temperaturas (800 – 900 °C). A energia necessária é fornecida através da queima de parte do combustível refeito (combustível secundário). O restante, que não é queimado, é arrefecido recuperando-se esse calor que também favorece a reação inicial. Depois de reduzida a temperatura do combustível secundário, passa-se para o processo de remoção do CO.



Quando aplicado a combustíveis líquidos ou gasosos, o processo denomina-se por “oxidação parcial”, aplicado a combustíveis sólidos denomina-se por “gaseificação”, sendo o princípio de funcionamento o mesmo.

Através da adição de água, o CO formado converte-se em CO<sub>2</sub> de acordo com a reacção (3). Isto permite reduzir a concentração do CO no “syngas” (ou no hidrogénio) de forma muito eficaz, atingindo-se concentrações entre 0,2 e 0,3 % de CO. Outros processos são também utilizados, mas com eficiências de conversão inferiores.

Nesta fase do processo tem-se uma mistura de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. A concentração de CO<sub>2</sub> nessa mistura varia entre 15 e 60 % (em base seca) e a pressão total varia tipicamente entre 2 e 7 MPa, [IPCC, 2005]. Para se obter uma fonte de energia livre de emissões, “basta” remover o CO<sub>2</sub> aí presente, obtendo-se H<sub>2</sub>. O processo mais antigo para esse efeito tem mais de 30 anos e consiste na remoção do CO<sub>2</sub> através de processos de absorção com solventes químicos. Unidades mais antigas utilizam este processo, lançando para a atmosfera o CO<sub>2</sub> capturado.

Contudo, unidades mais modernas utilizam para a separação do CO<sub>2</sub> um sistema sobre pressão, tipicamente cerca de 2,2 MPa, com absorventes sólidos, processo denominadas de *Adsorção com Alternância de Pressão* (Pressure Swing Adsorption – PSA). Este permite que todos os compostos com a excepção do H<sub>2</sub>, sejam adsorvidos e consequentemente removidos. Atingem-se níveis de pureza de H<sub>2</sub> de 99,999%.

Todas as possíveis contaminações, como componentes de enxofre presentes no combustível primário, são removidas imediatamente antes da injeção de vapor de água ou oxigénio.

Pelo facto de o CO<sub>2</sub> removido conter também vestígios H<sub>2</sub>, esse é adicionado à corrente que serve de combustível na primeira fase do processo, onde se dá a injeção de vapor. Essa combustão é possibilitada pela injeção de ar atmosférico, contendo CO<sub>2</sub>, e os gases resultantes dessa combustão, assim como o CO<sub>2</sub> previamente adicionado, acabam lançados para a atmosfera.

Um vector fundamental no processo, e em desenvolvimento paralelo, compreende os sistemas de queima do combustível, “syngas” ou outro gás. Esta área encerra uma grande importância no processo de melhoria de rendimento total do sistema.

Com este processo de sequestro do CO<sub>2</sub> é possível a obtenção de uma forma de energia que pode ser armazenada ou transportada para outro local, H<sub>2</sub>, não havendo emissão de poluentes gasosos na sua queima. Por essa razão, este é um processo que encontra actualmente em aplicação na produção de H<sub>2</sub> através de “steam reforming”.

Actualmente a maior unidade em funcionamento produz cerca de 480 toneladas de H<sub>2</sub> por dia, sendo metano o combustível primário. O processo é por isso conhecido como “Steam Methane Reforming” (SMR). Neste processo podem ainda ser utilizados outros hidrocarbonetos de baixa massa molecular, como a nafta [IPCC, 2005]

Um outro campo de aplicação da tecnologia de pré-combustão é a redução da percentagem de carbono em combustíveis onde a relação H:C seja baixa. É exemplo disso a gaseificação do carvão com a obtenção do chamado carvão limpo.

Com base nos processos de gaseificação, estão a ser desenvolvidos vários processos para tornar o carvão um combustível menos poluente e mais eficiente. Pretende-se que estes processos sejam aplicados em unidades industriais, centrais termoeléctricas ou outras instalações. Um exemplo destes trabalhos está em desenvolvimento no Instituto Nacional de Engenharia de Engenharia Tecnologia e Inovação (INETI). A tecnologia aí em estudo tem especial aplicabilidade na maior central termoeléctrica do País, em Sines, onde o combustível continua a ser o carvão.

## 2.2.Pós-combustão

Com este processo, como esquematizado na Figura 7, o CO<sub>2</sub> é removido da corrente gasosa resultante da queima de combustíveis como o carvão, gás natural, óleos, ou biomassa. Neste caso, os sistemas de queima não requerem alterações.

De entre as várias possibilidades para sequestrar o CO<sub>2</sub>, a pós-combustão apresenta-se como o processo mais simples e tecnicamente de aplicação mais fácil.

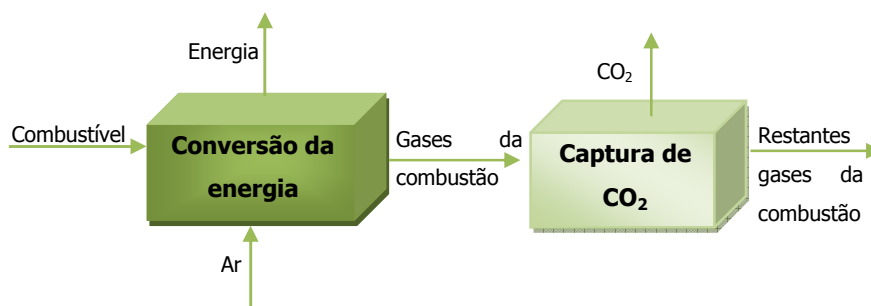


Figura 7 – Esquema do processo de pós-combustão para a captura de CO<sub>2</sub>

Da queima de quaisquer combustíveis fósseis, para além da energia resultam efluentes gasosos com elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>. O processo de captura por pós-combustão assenta na afinidade que algumas substâncias têm com o CO<sub>2</sub> e que permitem o seu sequestro da corrente gasosa. Após a passagem do efluente pelo equipamento que sequestra a maioria do CO<sub>2</sub> presente, os restantes gases são lançados para a atmosfera.

O sequestro pode ser efectuado através de absorventes líquidos ou adsorventes sólidos por processos químicos ou físicos, membranas selectivas, ou através da liquefacção do gás e posterior destilação do mesmo. A forma mais usual para este tipo de remoção é através de absorventes químicos.

Em termos teóricos a aplicação do SAC, instalado após a combustão, pode ser aplicado para a remoção de CO<sub>2</sub> resultante da queima de todo o tipo de combustíveis. Contudo, cada tipo de combustível tem as suas características próprias, assim como origina na sua queima para além do CO<sub>2</sub>, outros poluentes diferentes. O conhecimento do tipo de combustível é pois fundamental, tanto para o dimensionamento da própria unidade, como para o dimensionamento da sub-unidade de sequestro do CO<sub>2</sub>.

Gases resultantes de uma central que queima carvão contêm, para além do CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, outros poluentes, como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas, HCl, HF, mercúrio e outros metais, que podem ser problemáticos no processo. Nestes casos, de forma a promover a remoção desses poluentes, é necessária a instalação de equipamentos específicos que efectuem essa remoção antes do processo de remoção do CO<sub>2</sub>.

A separação através de absorventes/adsorventes é conseguida pelo contacto do efluente que contém o CO<sub>2</sub> com substâncias líquidas ou sólidas, que conseguem reter o CO<sub>2</sub>, e apenas o CO<sub>2</sub>.

Depois de retido, são alteradas as condições químicas ou físicas no meio, e o CO<sub>2</sub> é libertado, formando-se uma corrente gasosa essencialmente constituída por CO<sub>2</sub>. Por outro lado, a substância que retirou o CO<sub>2</sub> é regenerada, estando pronta a repetir o processo.

Uma das técnicas possíveis consiste na circulação contínua do absorvente (líquido) entre o local de contacto com o gás e um reactor onde, através de uma mudança das condições de temperatura, pressão ou outras, o CO<sub>2</sub> é libertado regenerando-se o absorvente. É novamente lançado para a área de contacto com o efluente gasoso repetindo esse circuito continuamente.

Adsorventes sólidos são também utilizados. Neste caso pode não haver movimentação da substância adsorvente. Esta pode permanecer na mesma câmara onde há o contacto com o efluente carregado com CO<sub>2</sub>. A libertação do CO<sub>2</sub> dá-se pela alternância de ciclos na câmara. Depois de um ciclo onde o efluente está em contacto com o absorvente, dá-se outro onde as condições de temperatura, pressão ou outras que permitam a libertação do CO<sub>2</sub> são proporcionadas nessa mesma câmara. Após a libertação do CO<sub>2</sub> reinicia-se o ciclo que põe novamente em contacto o efluente gasoso e o absorvente.

À semelhança dos absorventes líquidos, é necessária a adição de novo adsorvente para compensar o decaimento e possíveis perdas.

### 2.2.1. Absorventes químicos (líquidos)

Este processo de sequestro baseia-se na capacidade da reversibilidade das reacções químicas de um solvente alcalino em meio aquoso, geralmente uma amina, com um ácido, ou neste caso, com o CO<sub>2</sub>.

Regra geral, as emissões gasosas após libertadas da câmara de combustão encontram-se à pressão atmosférica. Nesta situação a pressão parcial do CO<sub>2</sub> será relativamente baixa, entre 3 e 15 kPa. Com estas condições, os solventes químicos, as aminas, aparentam ser uma boa opção.

Por outro lado, após a combustão o efluente gasoso encontra-se a temperatura muito mais elevadas que as admissíveis para os actuais absorventes químicos. Esse facto implica a correcção de temperaturas para valores entre 40 e 60 °C.

Depois de arrefecida, a corrente gasosa entra então em contacto com o absorvente. É aplicado um chuveiro de água que permite remover tanto as partículas aí presentes como partículas de solventes que possam ter ficado retidas. Após esse passo, essa corrente gasosa abandona a câmara de absorção.

Paralelamente, o absorvente rico em CO<sub>2</sub> é transferido para outra coluna onde se dá a libertação desse CO<sub>2</sub> e consequente regeneração do absorvente. Para se dar este processo, é elevada a temperatura nesta câmara a valores entre 100 e 140 °C, sendo a pressão próxima da atmosférica.

O fornecimento de energia para a regeneração do absorvente é um ponto que representa uma significativa diminuição de eficiência global da unidade de produção de energia.

Numa unidade comum, sem sistema de SAC, a elevada temperatura do efluente gasoso resultante da queima, é suficiente para garantir a sua elevação e dispersão na atmosfera. Com o sistema de remoção de CO<sub>2</sub> instalado, uma vez que a temperatura é reduzida e o processo ocorre à pressão atmosférica, é necessário um sistema extra que garanta um aumento da velocidade dos gases de exaustão de forma a compensar as perdas de energia provocadas no sequestro do CO<sub>2</sub>. Este facto agrava a perda de eficiência do sistema.

Este processo de sequestro permite reduzir a concentração de CO<sub>2</sub> nos gases de saída para valores muito baixos. Na prática obtêm-se remoções entre 80 e 95% de acordo com a reacção química em uso [IPCC, 2005]. A obtenção de menores concentrações obriga ao aumento da altura da coluna de absorção e origina maiores penalizações energéticas, devendo a percentagem final de remoção resultar de um compromisso entre o custo e o benefício associado.

Além da energia envolvida nos processos já referidos, o CO<sub>2</sub> terá de ser comprimido, processo que implica também gastos energéticos.

Os absorventes líquidos referidos apresentam capacidades interessantes na captura de CO<sub>2</sub>, contudo acarretam também grandes perdas de eficiência no sistema. Principalmente por esse motivo, outros solventes nobres estão a ser investigados

focando principalmente a redução da energia necessária para a regeneração do solvente.

Os próprios solventes aquosos, baseados em aminas, actualmente utilizados apresentam potencial para melhorias, através da utilização de soluções mais concentradas, facto que levará à redução do tamanho da coluna de absorção.

Paralelamente, o design do processo é também foco da actual investigação.

### 2.2.2. Adsorventes (sólidos)

Com o principal objectivo de reduzir a energia necessária para a regeneração da substância que recolhe o CO<sub>2</sub>, estão a ser desenvolvidas substâncias sólidas, capazes de operar em condições de altas temperaturas, limitando assim a perda energética associada.

O processo inerente aos adsorventes, que é o actualmente considerado com maior potencial, tem semelhanças com o já referido para os absorventes (líquidos). O efluente gasoso entra em contacto com o adsorvente, que pelas suas características sequestra o CO<sub>2</sub> aí presente. Contudo, ao contrário dos absorventes, neste processo não se dão reacções químicas. O CO<sub>2</sub> é removido por processos físicos. As substâncias usadas para sequestrar o CO<sub>2</sub> são molecularmente formadas por conjuntos de malhas que funcionam como crivos à passagem da corrente gasosa, retendo aí o CO<sub>2</sub>. A libertação do CO<sub>2</sub> é conseguida através da alteração das condições de pressão ou temperatura.

Uma vantagem da utilização de adsorventes, em detrimento de absorventes, é que estes sólidos permitem o contacto com correntes gasosas de temperaturas mais elevadas do que o verificado com os métodos que recorrem a sistemas de absorção húmidos. Este facto proporciona uma menor penalização na eficiência do sistema.

Um tipo de adsorventes com grande aplicação são os zeólitos. Estes são minerais naturais ou sintetizados caracterizados pela sua elevada selectividade na adsorção de moléculas pequenas, mesmo em baixas concentrações. Tal selectividade resulta da sua estrutura micro-porosa, como é visível no exemplo de zeólito presente na Figura 8.



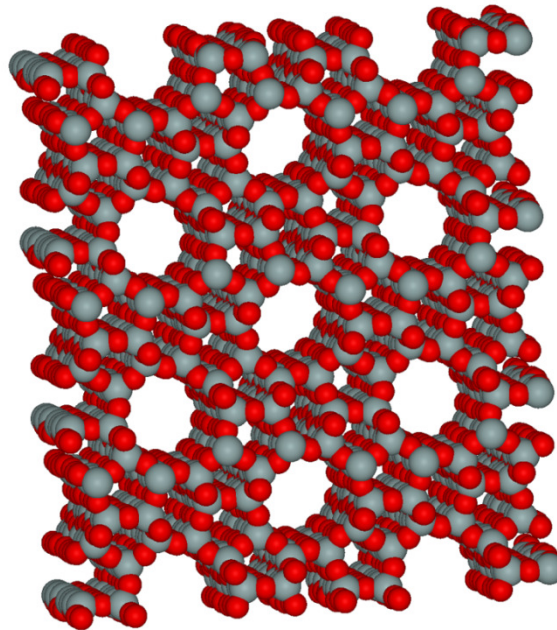


Figura 8 – Esquema de zeolito [URL 3]

Um dos vários zeolitos sintéticos conhecidos apresenta grande capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub>, quando comparado com o O<sub>2</sub> e o N<sub>2</sub>. Precisamente devido a essa característica, está a ser explorado para processos de separação de CO<sub>2</sub> de efluentes gasosos, através da tecnologia PSA (*Pressure Swing Adsorber* – PSA (*Adsorção com Alternância de Pressão*)).

O processo PSA pode ser considerado como uma sequência de três etapas básicas comuns a todos os processos PSA: pressurização, adsorção e despressurização. Durante a pressurização, o gás de alimentação (rico em CO<sub>2</sub>) é comprimido no leito onde está o zeolito até que seja atingida a pressão de operação. À medida que a alimentação entra no leito, os componentes mais facilmente adsorvidos passam para a fase estacionária, criando-se uma zona de gás rica nos componentes menos adsorvidos, próximo da saída do leito. Na etapa de adsorção, parte desse gás sai da coluna como produto. A corrente de produto é formada pelos componentes menos adsorvidos. (Neves & Schwartzman, 2005)

Durante a etapa de despressurização, o leito é despressurizado em contracorrente, produzindo-se uma corrente gasosa enriquecida nos componentes mais adsorvidos. Esta etapa faz a regeneração parcial do leito.

A principal característica de um processo PSA é que, durante a etapa de regeneração, as espécies preferencialmente adsorvidas são removidas pela redução da pressão total, ao invés de elevação da temperatura ou de purga com um agente deslocador. Este aspecto representa uma vantagem dos processos PSA sobre outros tipos de processos de adsorção porque a pressão pode ser alterada mais rapidamente que a temperatura, tornando possível a execução de ciclos rápidos e aumentando a produção por unidade de volume de leito adsorvente.

Outros adsorventes possíveis e actualmente em estudo para o sequestro de CO<sub>2</sub> são óxidos de sódio e óxidos de potássio. Outros, como os baseados em lítio ou em óxidos de cálcio (CaO), são também considerados.

Os compostos à base de lítio, para um processo de calcinação-carbonação, foram já estudados no Japão, em 1998 [IPCC, 2005]. Concluiu-se que o comportamento destes adsorventes é muito bom, apresentado uma boa reactividade, numa larga gama de temperaturas abaixo dos 700 °C, além de uma rápida regeneração a temperaturas altas e grande capacidade de regeneração e durabilidade na repetição dos ciclos captura-regeneração. Dado o elevado valor comercial dos compostos de lítio, a sua durabilidade é um factor determinante para a sua aplicação.

Um outro composto com capacidade para o sequestro de CO<sub>2</sub> é o CaO, porém note-se que este apresenta características distintas dos anteriormente referidos. A reacção que permite sequestrar o CO<sub>2</sub> do efluente gasoso através de CaO dá-se de forma rápida para temperaturas superiores a 600 °C. A sua regeneração, a calcinação de CaCO<sub>3</sub> originando CaO e CO<sub>2</sub>, é favorável para temperaturas a partir dos 900 °C (com pressão parcial de CO<sub>2</sub> de 0,1 MPa) [IPCC, 2005].

A principal diferença entre o CaO e os compostos de lítio é o facto de que o adsorvente natural, CaCO<sub>3</sub>, é rapidamente desactivado. Por esse motivo, é necessária uma corrente de adsorvente da mesma ordem de grandeza da massa de combustível que é consumido de forma a garantir o correcto desempenho do sistema de captura-regeneração. Contudo, este adsorvente tem um custo baixo e pode ser utilizado na indústria cimenteira como matéria-prima.

Um bom desempenho das substâncias que proporcionam a remoção do CO<sub>2</sub> será a chave para o sucesso desta tecnologia. Nesse sentido, a pesquisa de novas substâncias

é uma área emergente e espera-se que a investigação origine novos compostos mais eficientes capazes de ultrapassar as limitações dos actuais.

A enorme quantidade de efluente gasoso nas unidades produtoras de electricidade obriga a grandes áreas de contacto e grandes quantidades de adsorventes para uma eficaz remoção de  $\text{CO}_2$ . O equipamento necessário para a transferência dos mesmos entre reactores necessita por isso, ser de dimensões proporcionais.

Esse consumo energético dos equipamentos de grandes dimensões, aliado à energia necessária para a regeneração do adsorvente, representa uma relevante percentagem da energia consumida no processo que dá origem à já referida diminuição de eficiência do sistema.

### 2.3.Membranas selectivas

Outra forma de sequestro de  $\text{CO}_2$  de um efluente gasoso é através de aplicação de membranas selectivas. O processo é simples e está esquematizado na Figura 9. Conhecem-se membranas que permitem a separação de vários elementos, como o  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  ou  $\text{O}_2$ . Por sua vez, estas membranas podem ter diferentes origens, desde polímeros, materiais metálicos ou cerâmicos, e a sua selectividade está relacionada com a sua constituição.

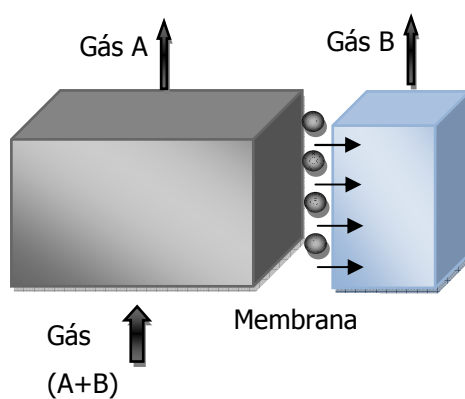


Figura 9 – Remoção de  $\text{CO}_2$  através de membranas selectivas

A separação de substâncias por este processo já se verifica em alguns processos industriais, como a remoção de  $\text{CO}_2$  do gás natural, onde o gás está a altas pressões e a concentração de  $\text{CO}_2$  é elevada [IPCC, 2005].

Contudo, a baixa pressão parcial do CO<sub>2</sub>, comum em efluentes gasosos (entre 3 e 15 kPa) origina fracas forças que impelem o gás a atravessar a membrana, dificultando por isso a separação do CO<sub>2</sub>.

Todavia a utilização de membranas nunca foi testada em condições de grande escala, necessárias para a captura de CO<sub>2</sub>.

Para a separação pretendida, remoção de CO<sub>2</sub> das correntes gasosas, quando comparada a utilização das actuais membranas selectivas com a aplicação dos processos de absorção/adsorção, as membranas apresentam grandes penalizações na eficiência energética das unidades de produção de energia. Para além disso, as actuais membranas apresentam também uma menor eficiência na remoção do CO<sub>2</sub> [IPCC, 2005].

Dadas as suas limitações e características, as membranas selectivas são encaradas como elementos importantes no melhoramento dos sistemas de absorção/adsorção. A utilização das membranas, nestas circunstâncias, tem recebido grande atenção, sendo essas vistas como "membranas híbridas". Esta aplicação das membranas permite, pois, uma grande área de contacto com o efluente gasoso, possibilitando a compactação de todo o sistema. A membrana é, neste caso, a barreira entre o efluente e o líquido (absorvente), já que a membrana não se envolve no processo de separação.

No caso de membranas porosas, os compostos difundem-se através dos poros, sendo depois recolhidos pelo líquido/sólido. No caso de membranas não porosas, os compostos são dissolvidos na membrana e depois difundem-se através da mesma.

A área de contacto entre o gás e o líquido é continuamente assegurada pela membrana, independentemente da taxa de circulação do efluente gasoso ou do líquido. Nestes casos, a selectividade é determinada pelo absorvente/ adsorvente em utilização.

A utilização deste tipo de sistemas combinados (membrana/ solventes) melhora o desempenho operacional das unidades, para além de fixar a área de interface para a transferência de massa, o que permite variar o caudal, quer do efluente gasoso, quer da substância que remove o CO<sub>2</sub> [IPCC, 2005].

Como já referido, este sistema permite a compactação de equipamentos, levando por essa via também à redução de custos.

Um parâmetro fulcral é a eficaz combinação entre o solvente e a membrana em causa, assegurando que não se verifique transferência de solvente através da membrana, mesmo em condições de baixas pressões do efluente gasoso, pressões que não promovam a transferência do gás.

Estas membranas (facilitadoras de transporte) assentam no princípio de formação de compostos complexos ou em reacções químicas reversíveis dos componentes presentes no efluente gasoso com os componentes presentes na membrana. Esses complexos ou produtos das reacções são depois transportados através da membrana. Como nos processos de transferência em membranas induzido por diferenças de pressão, as forças que induzem a separação dos componentes é a diferença da pressão parcial dos componentes a ser transferidos.

À medida que a pressão total aumenta na “alimentação”, a permeabilidade de componentes indesejados aumenta. Isto é resultado directo da diminuição de selectividade. A selectividade é também afectada pela redução da espessura da membrana.

#### 2.4.Liquefacção do gás

Uma outra forma para a separação de constituintes de uma mistura gasosa é através da liquefacção e posterior destilação fraccionada como esquematizado na Figura 10.

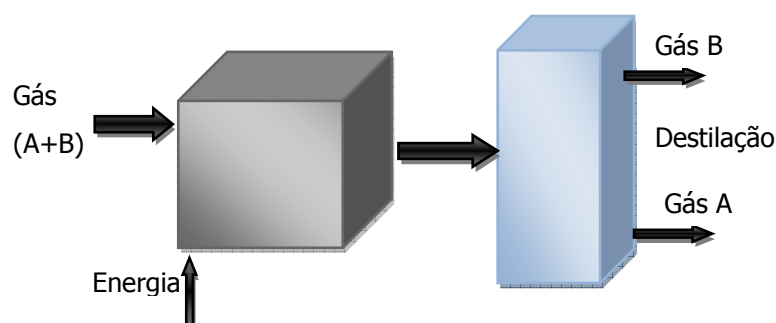


Figura 10 – Processo de remoção de CO<sub>2</sub> recorrendo à liquefacção do efluente gasoso

Para tal são alteradas as condições de pressão e temperatura para que permitam a alteração de estado pretendida. Seguidamente é promove-se a destilação fraccionada

desse líquido, separando os componentes presentes. No caso em estudo, a destilação teria como objectivo a separação do CO<sub>2</sub> dos restantes compostos.

Este tipo de operação é também aplicado para a separação dos componentes do Ar em grande escala. Por este facto, este procedimento pode ser associado a outras tecnologias de SAC, como em processos de oxi-combustíveis e sistemas de sequestro de pré-combustão para a produção de O<sub>2</sub>.

Apesar de a liquefacção permitir tecnicamente a remoção de CO<sub>2</sub> de outros gases, a sua aplicação perfila-se para a remoção de impurezas em misturas altamente concentradas, por exemplo resultantes de processos de oxi-combustíveis ou remoção de CO<sub>2</sub> na síntese de gás natural.

### 2.5.Oxi-combustíveis

Esta técnica tem como princípio básico o facto de a combustão ser propiciada através da injeção de oxigénio em vez do ar atmosférico. Para fins de remoção de CO<sub>2</sub>, a técnica está ainda em desenvolvimento, enquanto que para fins industriais, este princípio é já aplicado em sectores como a produção de alumínio, aço ou vidro.

Este processo, para além de produzir energia, originará vapor de água (H<sub>2</sub>O), CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> (em excesso na mistura para garantir uma combustão completa). Outros contaminantes podem ser encontrados devido à sua existência no combustível ou devido a fugas do ar atmosférico para o sistema.

Este processo elimina o N<sub>2</sub> e seus derivados do efluente gasoso, uma vez que a combustão dos hidrocarbonetos ou outro combustível orgânico é proporcionada pela presença de oxigénio puro ou uma mistura de oxigénio e CO<sub>2</sub>. Uma eficaz remoção de inertes ou gases contaminantes pode permitir que uma segunda fase, necessária para essa remoção, seja eliminada.

A combustão com oxigénio puro permite atingir temperaturas de cerca de 3500 °C, muito acima das temperaturas padrão das centrais térmicas. Com a actual tecnologia, as temperaturas são limitadas a cerca de 1300-1400 °C, na turbina de gás, e cerca de 1900 °C, na caldeira de vapor adjacente à combustão. Assim, a temperatura de combustão é controlada pelo fluxo de gases re-circulados presentes na câmara de combustão.

É de notar que, nestes sistemas, a eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> pode atingir valores muito próximos de 100%.

À semelhança de todas as tecnologias de SAC, o CO<sub>2</sub> produzido necessita de ser desidratado para impedir a oxidação dos metais onde é armazenado, assim como necessita de ser monitorizado, de forma a assegurar que não contém outras substâncias, como ácidos, SO<sub>x</sub> ou Hg, e assim seguir para armazenamento, garantindo-se que não surgirão contaminações que poderiam ser muito graves.

## 2.6. Processos industriais

O processo de isolamento de CO<sub>2</sub> efectua-se recorrentemente em alguns processos industriais, por motivos que não os ambientais, visto que, depois de separado, o CO<sub>2</sub> é libertado para a atmosfera, dado não existirem incentivos à implementação de outros procedimentos.

Exemplos deste processo são as unidades de produção de gás natural, onde no processo de purificação, o CO<sub>2</sub> é removido.

Dependendo da sua origem, o gás natural apresenta diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> na sua constituição natural. Contudo, as especificações dos *pipelines* por onde o gás natural circula, geralmente exigem que a concentração máxima de CO<sub>2</sub> seja inferior a 2% em volume. A razão deste facto deve-se a princípios de prevenção de corrosão dos *pipelines*, aumentar o poder calorífico do gás, assim como melhorar a eficiência no seu transporte.

Apesar de não se conhecer com precisão qual a percentagem de CO<sub>2</sub> no gás natural recolhido dos vários locais espalhados pelo globo, é razoável assumir-se que metade desta matéria-prima contém mais de 4% de CO<sub>2</sub> em volume [IPCC, 2005].

Tendo sido, em 2003, a produção mundial de gás natural de 2618,5 biliões de metros cúbicos, a redução da concentração de CO<sub>2</sub> de 4 para 2%, em metade dessa produção, representa pelo menos 50 Mt CO<sub>2</sub> /ano [IPCC, 2005]. Esta fonte de CO<sub>2</sub> ilustra, aliás, o potencial que a tecnologia de SAC tem neste campo. Actualmente estão em operação duas unidades de produção de gás natural onde o CO<sub>2</sub> é capturado e armazenado: a unidade da BP In Salah, na Argélia, e a unidade da Statoil, em Sleipner, no mar no Norte.

O processo de injeção de CO<sub>2</sub> está também a ser efectuado nos Estados Unidos da América, para facilitar a extracção de gás natural. Nestas unidades (Beecy e Kuuskraa) são anualmente injectados 6,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>.

Note-se também que as actividades de produção de cimento, aço ou de amónia são algumas das que implicam a separação de CO<sub>2</sub> nos seus processos normais de laboração.

A nível mundial, o sector industrial com maior consumo de energia é destacadamente o sector da produção de ferro e aço. Este sector representa entre 10 e 15% da energia consumida pelo sector industrial e, por sua vez, estão associadas a este sector de actividade emissões de 1442 Mt CO<sub>2</sub>, no ano de 1995 [IPCC, 2005].

Da produção de cimento resultam cerca de 6% do total de emissões de CO<sub>2</sub> originado em fontes estacionárias, emissões essas com concentrações entre 15 e 30% em volume. Comparativamente, tipicamente as centrais termoeléctricas têm emissões com concentrações de CO<sub>2</sub> entre 3 e 15%. As elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>, neste sector, resultam não só da queima de combustíveis fósseis para se atingir as elevadas temperaturas necessárias à calcinação das rochas (calcárias), como também devido à própria reacção de conversão de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) a óxido de cálcio (CaO) com libertação de CO<sub>2</sub>.

A produção de H<sub>2</sub> é um outro sector que origina à libertação de CO<sub>2</sub>, propício a ser sequestrado e armazenado. Na maioria das unidades actuais, a produção baseia-se em processos PSA (*Pressure Swing Adsorber*). Nestas unidades, a remoção de CO<sub>2</sub> seria atingida através de pequenas alterações no processo. Estas podem ser projectadas para a recolha do H<sub>2</sub> puro assim como recolher separadamente o CO<sub>2</sub> sendo as emissões gasosas um terceiro produto, livre de H<sub>2</sub> e de CO<sub>2</sub> que será libertado para a atmosfera.





### 3. Transporte

Excluindo os casos em que as fontes de CO<sub>2</sub> se encontram sobre os locais de armazenamento geológico, o CO<sub>2</sub> necessita ser transportado, muitas vezes grandes distâncias, até ao local onde possa ser armazenamento definitivamente.

Este transporte é a fase posterior ao sequestro, e pretende-se que seja a menor possível de forma a minimizar os seus riscos e custos.

À temperatura e pressão ambiente, o CO<sub>2</sub> encontra-se sob a forma de um gás, é inodoro e ligeiramente tóxico. Nessa condição, a sua massa volúmica é de 1,98 kg/m<sup>3</sup>, cerca de 1,5 vezes a do ar atmosférico. Capturado em grande escala como pretendido, o CO<sub>2</sub> ocuparia demasiado espaço nas condições ambientes, por isso essas terão de ser alteradas para permitir o seu transporte e posterior armazenamento.

Dadas as suas características, o CO<sub>2</sub> pode encontrar-se num dos 3 estados possíveis, gasoso, líquido ou sólido. Contudo, apesar de possível, a solidificação do CO<sub>2</sub> exige muito mais energia que a sua compressão ou liquefacção, não sendo por isso uma opção viável do ponto de vista energético. Assim, a forma mais propícia para o transporte do CO<sub>2</sub> é aproximando as suas condições ao GPL (Gases de Petróleo Liquefeito), nomeadamente propano e butano.

Esta aproximação permite a transposição de todas as tecnologias já desenvolvida para esse fim, evitando-se riscos e investimentos.

O GPL é nos dias de hoje transportado em grandes distâncias e grandes quantidades de forma rotineira. O conhecimento desse transporte, quer em navios, comboios ou *pipelines* será aplicável ao transporte de CO<sub>2</sub>.

Hoje, os *pipelines* são considerados não só um processo já maduro como, para grandes distancias, são o processo mais comum no transporte de grandes quantidades de líquidos e gases. Existem condutas ao longo de milhares de quilómetros, atravessando desertos, serras, zonas populosas e até mares a mais de 2200 metros de profundidades.

Especificamente para transporte de CO<sub>2</sub> existem já instalados mais de 2500 quilómetros de *pipelines* nos EUA transportando mais de 50 MtCO<sub>2</sub>/ano. Este CO<sub>2</sub> é capturado em fontes naturais ou antropogénicas e tem como fim a sua injeção em campos de petróleo. Aí libertado, o CO<sub>2</sub> expande-se forçando a expulsão do petróleo presente. Esta técnica, além de facilitar a recolha de petróleo, propicia a dissolução do CO<sub>2</sub>, diminui-se a viscosidade do petróleo, levando isso por sua vez a um aumento da taxa de extracção.

Actualmente a pressão do gás para o transporte é da ordem dos 8 Mpa (cerca de 80 atm). Pesquisas e desenvolvimentos, não especificamente para o transporte de CO<sub>2</sub> mas para gases como o GPL estão em progresso, e, como referido, esses resultados podem ser aplicados ao CO<sub>2</sub>. Pretende-se com esses desenvolvimentos aumentar o volume de gás transportado aumentando a sua pressão de transporte para valores que podem atingir 80 MPa, [IPCC, 2005].

Dependendo da situação e da distância em causa, o tipo de transporte terá de ser ajustado. Para muitos casos, a opção mais económica será o transporte por navio. Na Figura 11 pode ver-se a análise de comparativa de custos para o transporte em *pipelines* em terra, no mar e por barco, [IPCC, 2005].

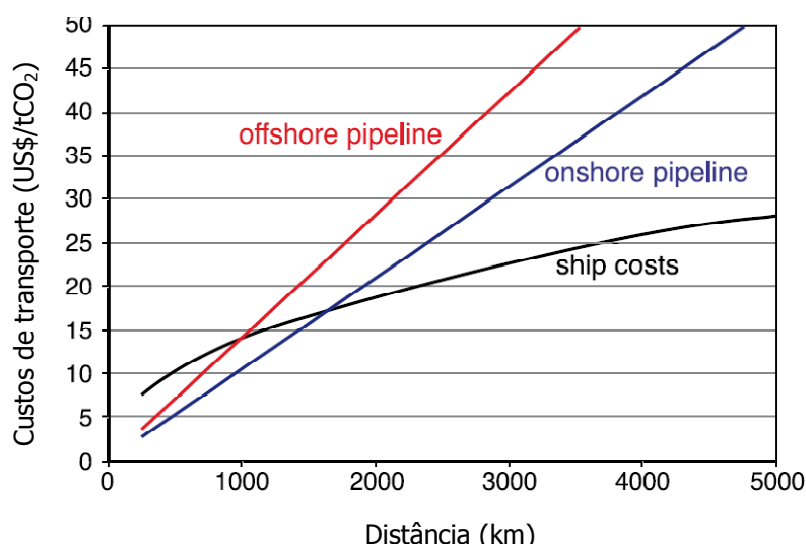


Figura 11 – Custos para o transporte de CO<sub>2</sub> através de *pipelines*, em terra ou no oceano, e através de navio em função da distancia a percorrer [IPCC, 2005].

Como se observa na Figura 11, para transportes de distâncias mais curtas, inferiores a 1500 km, o transporte através de *pipeline* quer em terra quer por mar é a opção mais económica. Para distâncias superiores, o transporte por navio torna-se a opção mais interessante, aumentando essa vantagem com aumento da distância a transportar o CO<sub>2</sub>.



## 4. Possibilidades para o armazenamento de CO<sub>2</sub>

O armazenamento de CO<sub>2</sub> é a ultima fase do processo e a razão que justifica todo o esforço necessário ao seu sequestro da corrente gasosa. O sucesso desta etapa, o armazenamento definitivo do CO<sub>2</sub> é fulcral para a existência desta tecnologia.

Não sendo uma operação tecnologicamente tão exigente como o seu sequestro, o armazenamento do CO<sub>2</sub> é, sem dúvida, a fase mais crítica e controversa em termos ambientais.

Actualmente as formas possíveis para o armazenamento definitivo do CO<sub>2</sub> são:

- Armazenamento geológico
- Mineralização e aplicação do CO<sub>2</sub> na Indústria.
- Armazenamento no oceano

Nos casos onde é imprescindível uma fase de transporte do CO<sub>2</sub>, as condições físicas necessárias a essa tarefa permitem que na fase do seu armazenamento, os gastos energéticos para a sua compressão sejam minimizados, visto isso já ter sido efectuado.

Contudo para os casos em que o CO<sub>2</sub> é armazenado nos locais onde é sequestrado, é necessária a sua compressão.

A liquefacção do CO<sub>2</sub> ocorre a pressões superiores a 5,1 atm, como se observa na Figura 12, o ponto triplo, onde ocorrem as 3 fases simultaneamente, acontece quando se propicia a pressão de 5,1 atm e simultaneamente uma temperatura de -56,6°C. A variação desses parâmetros promove estados físicos diferentes.

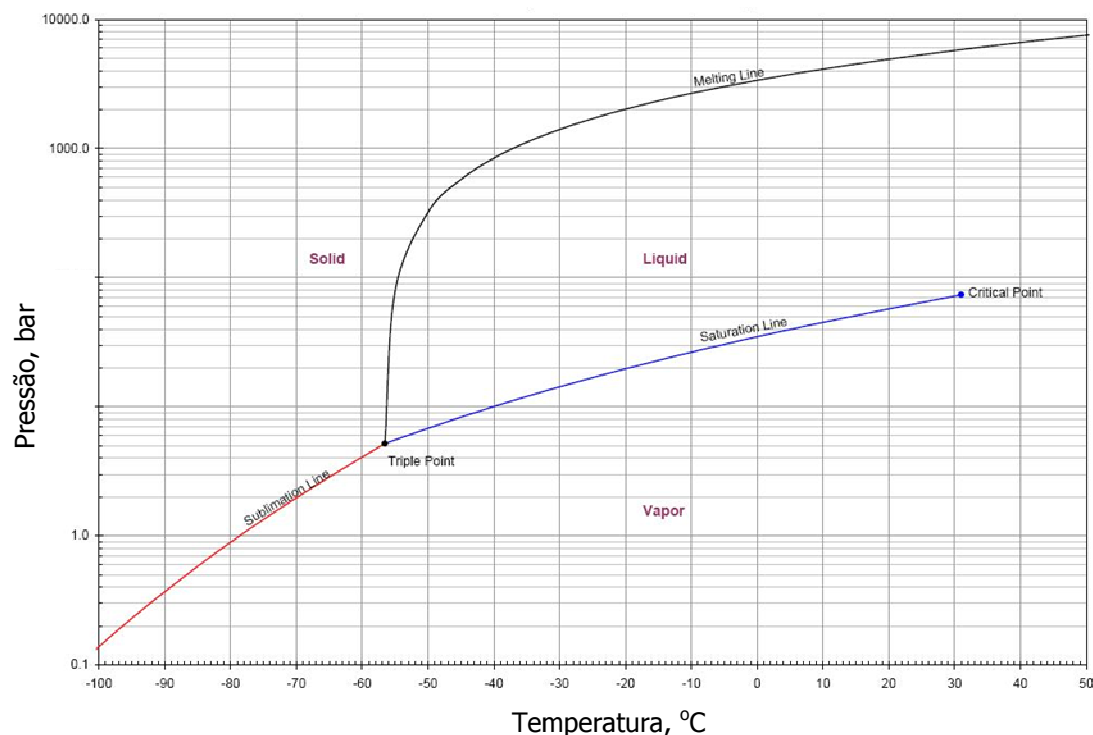


Figura 12 – Diagrama de estado do CO<sub>2</sub> em função da pressão e da temperatura [IPCC, 2005]

Proporcionando a pressão de 77,1 atm e a temperatura de 31,1°C atinge-se o ponto crítico. Nesse ponto o CO<sub>2</sub> encontra-se num estado fluido, não existindo distinção entre o estado gasoso e o estado líquido, apresentando características dos dois estados. Nas condições referidas, ou acima delas, o CO<sub>2</sub> é designado como fluido supercrítico. O CO<sub>2</sub> apresenta, nas condições de supercrítico, uma grande diminuição de volume e um correspondente aumento de massa volúmica. De 200 g/m<sup>3</sup> em condições PTN, passa para cerca de 700 g/m<sup>3</sup> [IPCC, 2005], o que representa as condições adequadas para o seu armazenamento em zonas rochosas.

#### 4.1. Armazenamento geológico

A superfície da Terra é largamente o maior reservatório de carbono conhecido, para além de todo o carbono armazenado na biosfera e no solo, o carbono encontra-se armazenado também sob várias formas como em carvão, petróleo, gás natural, rochas calcárias e mesmo no seu estado mais puro, CO<sub>2</sub>.

O armazenamento de carbono na crosta terrestre tem sido um processo natural desde a sua criação. Contudo, a partir da década de 70 nos EUA, este armazenamento

começou a ser induzido pelo Homem. Com o objectivo de facilitar a recolha de petróleo, o CO<sub>2</sub> resultante do processo de refinação foi, e continua a ser, colocado nos reservatórios provocando assim a expulsão do crude. Não sendo inicialmente o objectivo prioritário deste processo a preservação ambiental, este processo tem vindo a ser utilizado na indústria petrolífera em todo o mundo, evitando-se dessa forma que algum CO<sub>2</sub> seja libertado para a atmosfera.

Hoje, todas as grandes companhias petrolíferas, de minério de carvão e de geração de electricidade estudam, com o objectivo de mitigar os seus efeitos ambientais, essa forma de armazenamento geológico. Por este facto a partir da década de 90 esta tecnologia passou de um conceito de pouco interesse a uma tecnologia com grande potencial para fazer frente aos problemas ambientais.

O armazenamento geológico pretendido apenas poderá ocorrer em algumas zonas do planeta que apresentam características geológicas muito específicas. Sem dúvida que os reservatórios existentes e que retiveram gás natural e petróleo ao longo de milhões de anos são locais com provas dadas, de que possuem todas as características necessárias ao armazenamento do CO<sub>2</sub>.

Outras zonas, com as mesmas características geológicas estão também já identificadas. As características procuradas são a existência de uma camada de arenito poroso preenchido com água salgada, coberto com uma camada de xisto impermeável de forma a impedir a fuga do CO<sub>2</sub>. Todas estas camadas estão bem abaixo dos níveis da água potável [URL 4].

A injeção de gases em zonas rochosas, é também utilizado em todo o mundo para o armazenamento de gás natural em grande escala, como acontece em Portugal. Este armazenamento é realizado através da colocação de gás natural em cavernas subterrâneas a alta pressão (pressão máxima de 180 bar). Essas cavernas estão construídas na zona do Carriço devido às características geológicas da zona dividem-se por 6 cavernas, com um volume unitário de aproximadamente 300.000 m<sup>3</sup> [URL 5].

O histórico de aplicações com este tipo de armazenamento concerne-lhe um desenvolvimento considerável comparativamente com outras formas armazenamento também consideradas.



Considerando um gradiente geotérmico de 25 °C/km e uma temperatura á superfície de 15 °C, a cerca de 1000 metros de profundidade, o CO<sub>2</sub> atinge a densidade de 700 g/m<sup>3</sup>, ou seja, atinge as condições do seu ponto crítico e passa a ser um fluido supercrítico (Figura 13).

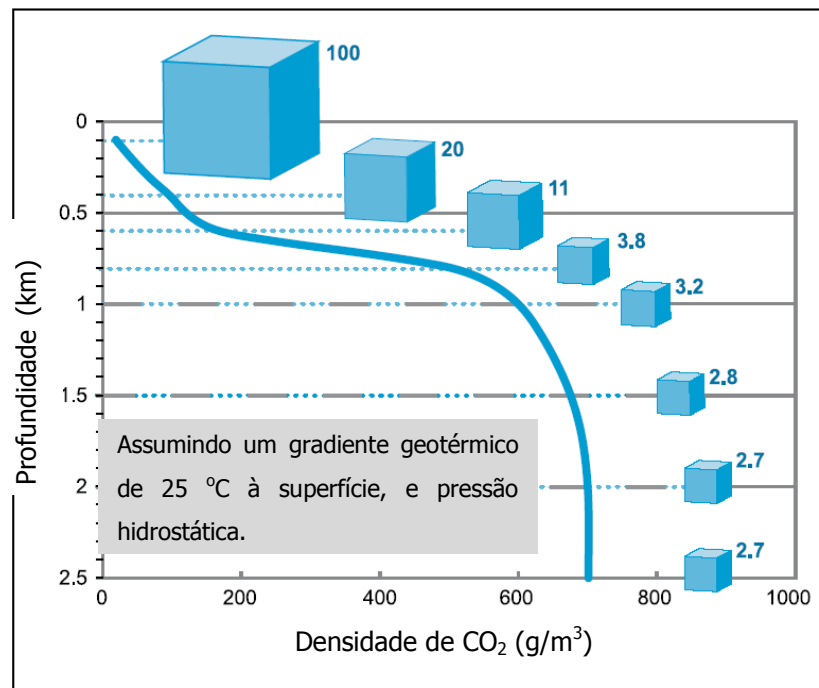


Figura 13 – Variação da densidade do CO<sub>2</sub> em função da profundidade a que é armazenado [IPCC, 2005]

A pressão resultante da profundidade necessária ao seu armazenamento, faz com que o CO<sub>2</sub> permaneça sob a forma de fluido supercrítico, estado físico que propicia a sua fixação nos espaços intestinais das rochas porosas aí existentes.

Assim, as condições óptimas para o armazenamento do CO<sub>2</sub> são as próximas do seu ponto crítico.

Após atingir a profundidade pretendida, o CO<sub>2</sub> irá vagarosamente espalhar-se pelos poros existentes. O comportamento esperado é que parte desse CO<sub>2</sub> fique definitivamente bloqueado após a selagem dos furos de injeção. Outra parte poderá mover-se durante alguns anos, até que deverá reagir com os restantes fluidos e rochas aí existentes, mineralizando.

São conhecidos, em operação, três projectos à escala industrial onde o CO<sub>2</sub> está a ser armazenado geologicamente. São o projecto Sleipner, que injecta CO<sub>2</sub> numa formação salina offshore na Noruega, o projecto Weyburn, no Canadá, que está associado à extracção de petróleo, e o projecto In Salah, na Argélia, inserido num campo de extracção de gás natural.

O potencial desta forma de armazenamento não é ainda totalmente claro, as dúvidas existem na determinação de quão grande é a capacidade de armazenamento a nível global. Estima-se que em reservatórios de gás e petróleo desactivados exista uma capacidade de armazenamento entre 675 e 900 Gt de CO<sub>2</sub>. Em formações salinas as estimativas apontam para uma capacidade de pelo menos 1000 Gt, podendo essas localizações representarem uma capacidade 10 vezes superior [IPCC, 2005].

Os locais de armazenamentos conhecidos são tanto em terra como no mar e estão espalhados por todo o globo, conhecendo-se um grande potencial nas regiões onde estão concentradas as maiores fontes de emissões.

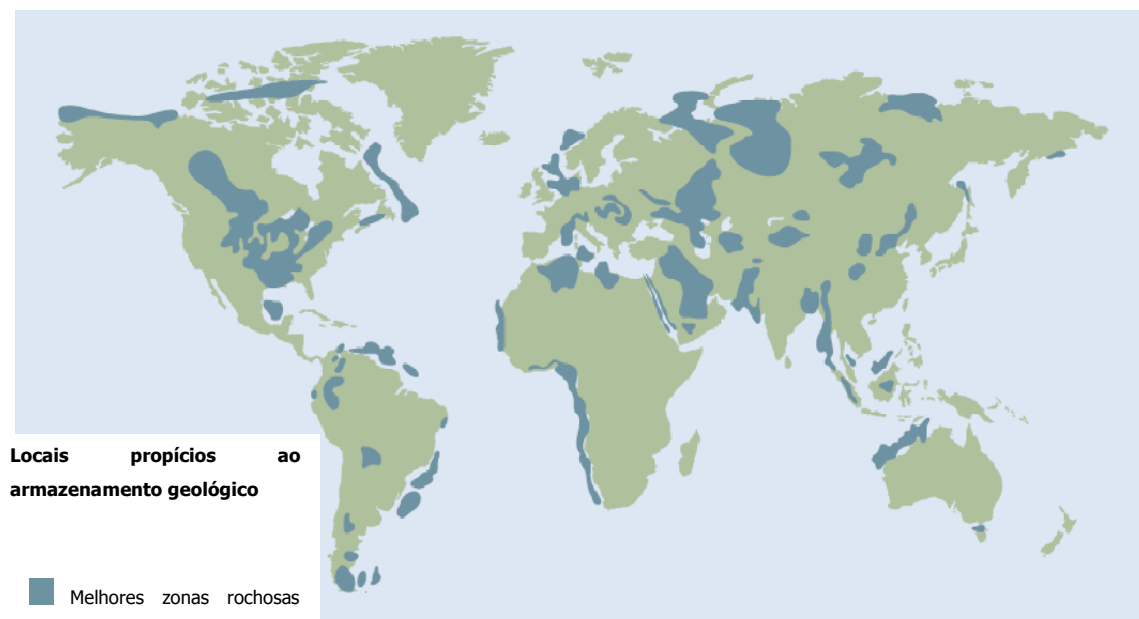


Figura 14 – Locais propícios ao armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> [URL 6]

À semelhança de todos os processos da tecnologia SAC, os custos para o armazenamento do CO<sub>2</sub> não estão ainda claramente quantificados, variando muito esse valor de local para local. Estima-se que para esta fase, e posterior monitorização, os

custos estarão compreendidos entre 0,6 e 8,3 USD por tonelada de CO<sub>2</sub>. Nas situações em que é utilizado no favorecimento da extracção de petróleo, o seu armazenamento representa um benefício entre 10 e 16 USD por tonelada de CO<sub>2</sub>.

Apesar do enorme potencial reconhecido a esta forma de armazenagem de CO<sub>2</sub>, existe ainda um caminho a percorrer até se chegar a uma tecnologia de armazenamento geológico que garanta todos os níveis de segurança exigidos, principalmente a nível ambiental. A este processo estará sempre associado o risco de fuga de CO<sub>2</sub>, que caso ocorresse, colocaria em perigo não só o ambiente e os ecossistemas como a vida humana próxima das áreas de fuga.

#### 4.2. Mineralização e aplicações do CO<sub>2</sub> na indústria

Para além do armazenamento geológico, após capturado o CO<sub>2</sub> pode ter outros destinos. Uma dessas opções é a sua utilização em aplicações industriais.

Devido às suas características naturais, o CO<sub>2</sub> é uma substância com um grande aplicabilidade na indústria química e alimentar. Pode ser usado como substituto de outras substâncias ou apresentar mesmo características mais interessantes que qualquer outra. É usado como agente inerte no embalamento de alimentos, em sistemas de soldadura, em extintores de incêndios, sistemas de tratamento de águas, indústria de papel e muitas outras aplicações de pequena escala.

Contudo é fundamental analisar o ciclo de vida dos produtos ou processos onde é usado o CO<sub>2</sub>. Não é interessante usar o CO<sub>2</sub> em situações onde esse seja rapidamente libertado para a atmosfera.

Estão também a ser desenvolvidos novos processos para a produção de químicos e polímeros onde o CO<sub>2</sub> é usado como de fonte de carbono, substituindo substâncias como metano ou metanol [IPCC, 2005].

A utilização de CO<sub>2</sub> na indústria representa anualmente cerca de 115 mil toneladas. Contudo, esse volume de CO<sub>2</sub> representa apenas 0,5% das emissões antropogénicas anualmente, que são cerca de 24 Giga toneladas [IPCC, 2005].

### 4.3. Armazenamento em oceano

Setenta por cento da superfície da Terra está coberta pelos oceanos, tendo esses uma profundidade média de três mil e oitocentos metros. Este espaço representa um volume quase infindável onde fisicamente o CO<sub>2</sub> antropogénico poderia ser armazenado. Existe contudo um equilíbrio natural entre a concentração de CO<sub>2</sub> no oceano e na atmosfera que distingue estas das restantes formas possíveis para o armazenamento do CO<sub>2</sub>.

Devido a esse equilíbrio, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera reflecte-se também na concentração nas águas oceânicas. A taxa de absorção de CO<sub>2</sub> aumentou em cerca de 7 Giga toneladas por ano. Durante os últimos 200 anos, os oceanos absorveram da atmosfera cerca de 500 Giga toneladas das 1300 resultantes das emissões antropogénicas.

O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> nas camadas superiores do oceano origina um ligeiro aumento do seu pH, alteração que é virtualmente imperceptível nas camadas mais profundas. Contudo, ecossistemas marinhos mais sensíveis estão já a ser afectados pelas alterações das condições químicas do oceano. Os corais oceânicos, por exemplo, têm vindo a diminuir os seus processos de calcificação reduzindo o seu crescimento.

Para além de ser um “reservatório” natural, CO<sub>2</sub> capturado poderá também ser aí deliberadamente injectado onde ficaria por centenas de anos. Para tal, poderia ser transportado por navio ou via pipeline sendo libertado, quer no fundo do oceano, onde se crê que se formariam “lagos” de CO<sub>2</sub>, quer sendo libertado na coluna de água.

Porém, o conhecimento existente neste processo resulta apenas de testes laboratoriais e de resultados de modelos matemáticos. É por isso incerta a forma como irão reagir os ecossistemas a rápida injeção de CO<sub>2</sub> no seu meio.

Depois de libertado no oceano, o CO<sub>2</sub> permanecerá aí por várias centenas de anos, aumentando essa imobilização com a profundidade a que é injectado. Contudo, a uma escala milenar, o equilíbrio que será atingido será o mesmo que na situação de o CO<sub>2</sub> ter sido libertado para a atmosfera. [IPCC, 2005]

Devido às suas características físicas, quando colocado a uma profundidade superior a 2700 metros, o CO<sub>2</sub> passará a um estado sólido, tornando-se mais denso que a água [URL 7].

Contudo qualquer que seja a forma e a profundidade em que é colocado, ocorrerão sempre fenómenos de dissolução do CO<sub>2</sub> na água, facto que levará a uma diminuição do pH da água oceânica.

Considerando a selecção natural na evolução das espécies, e tendo em conta que, por um lado as condições físico-químicas das zonas mais profundas do oceano são muito estáveis, e que o CO<sub>2</sub> é um elemento raro nessas regiões, os ecossistemas aí existentes serão seriamente afectados pela injeção do CO<sub>2</sub>.

Apesar de esta forma de armazenamento ser o mais económico de entre todas as possibilidades de armazenamento, pelos impactos esperados e principalmente pelas incertezas ainda associadas a esta forma de armazenamento, este é de entre as opções conhecidas a que reúne menos consenso e aceitação.

## 5. Aplicação do Sequestro e Armazenamento de CO<sub>2</sub> em Portugal

Neste capítulo pretende-se avaliar o potencial e o benefício da aplicação da tecnologia de SAC em Portugal.

Como explanado anteriormente, o sequestro de CO<sub>2</sub> é pretendido para situações bem balizadas, que são as grandes fontes pontuais, e que representam actualmente a maior fatia das emissões de CO<sub>2</sub>.

São apresentados dados relativos a 2007 e 2005, visto que último inventário Nacional de emissões reporta a valores de 2005, enquanto que as restantes fontes caracterizam situações mais recentes.

Em Portugal, o gás com efeito estufa mais emitido é o CO<sub>2</sub>, que em 2005 representou 78% do total das emissões de gases com efeito estufa [Ferreira *et al*, 2007].

Por sua vez, as actividades responsáveis por essas emissões são as associadas à produção eléctrica, sendo esse sector responsável pela emissão de aproximadamente 90% de todo o CO<sub>2</sub> total emitido nesse ano [Ferreira *et al*, 2007].

A grande preponderância do sector energético nas emissões de gases com efeito estufa, e em particular nas emissões de CO<sub>2</sub>, deve-se ao facto de a actual produção energética nacional assentar essencialmente na queima de combustíveis fósseis, como o gás, o fuel e o carvão.

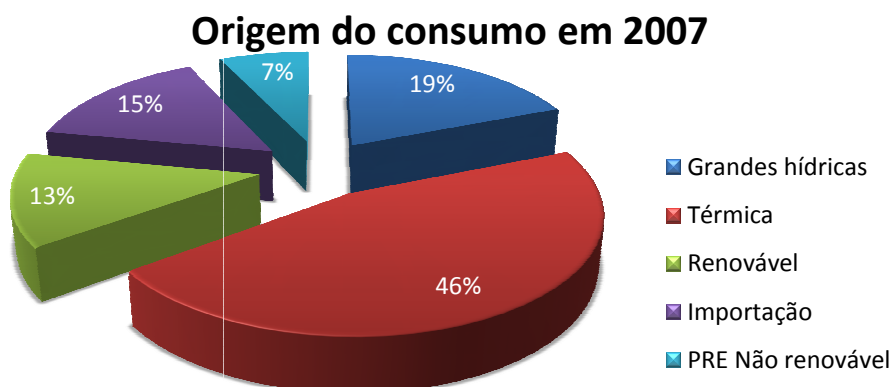


Figura 15 – Origem da electricidade consumida em Portugal em 2007 [URL 5]

As necessidades energéticas Nacionais são (em 2007) suportadas um conjunto de unidades apresentadas na Tabela 1, que, com a importação de 15% da energia consumida, garantem as necessidades de Portugal.

Tabela 1 – Principais unidades produtora de electricidade em Portugal e respectiva potencia instalada [Ferreira, 2007]

	<b>Combustível</b>	<b>Potência instalada [MW]</b>
<b>Turbogas</b> - Tapada do Outeiro	Gás natural	990
<b>Soporgen</b>	Gás natural	67
<b>Energim</b>	Gás natural	44
<b>Mortágua</b>	Biomassa e gás natural	9
<b>Pêgo</b>	Carvão	615
<b>Carregado</b>	Fuelóleo e gás natural	710
<b>Ribatejo</b>	Gás natural	1.176
<b>Alto do Mira</b>	Diesel	132
<b>Barreiro</b>	Fuelóleo	56
<b>Setúbal</b>	Fuelóleo	946
<b>Sines</b>	Carvão	1.192
<b>Tunes</b>	Diesel	197

De entre todas as grandes fontes instaladas, destacam-se pelas suas potências instaladas, as unidades do Ribatejo e a unidade de Sines, e pelo combustível utilizado a unidade do Pêgo.

As centrais termoeléctricas de Sines e do Ribatejo são os centros produtores de energia mais importantes em Portugal, com mais de 1.000 MW de potência instalada cada. Contudo, visto que o combustível utilizado na unidade do Sines é o carvão betuminoso, em termos ambientais esta unidade representa maiores impactos que as restantes.

Apesar de mais antiga, a unidade de Sines, com uma potência instalada de 1.192 MW, é ainda a unidade mais relevante no fornecimento energético Nacional. Em 2007 foi responsável pela produção bruta de mais de 10 GWh, como visível na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização das principais unidades electroprodutoras em Portugal [EDP, 2007]

	<b>Carregado</b>	<b>Setúbal</b>	<b>Sines</b>	<b>Barreiro</b>	<b>Tunes</b>	<b>Ribatejo</b>	<b>Mortágua</b>
<b>Produção bruta de electricidade (MWh)</b>	271.251	1.340.481	10.268.960	170.974	1.031	5.865.264	56.857
<b>Produção líquida de electricidade (MWh)</b>	239.300	1.234.934	9.694.232	144.995	850	5.728.223	51.389
<b>Produção de vapor</b>	n.a.	n.a.	n.a.	1.599	n.a.	n.a.	n.a.
<b>Fuelóleo (t)</b>	37.074	303.490	4.999	90.338	n.a.	n.a.	n.a.
<b>Gasóleo (t)</b>	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	458	n.a.	158
<b>Carvão (t)</b>	n.a.	n.a.	3.664.500	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
<b>Gás Natural (Nm<sup>3</sup>x10<sup>3</sup>)</b>	31.496	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	952.914	798
<b>Resíduos Florestais (t)</b>	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	112.468

A grande diferença entre as duas maiores unidades Nacionais reside no combustível usado. Sines é a unidade com desempenho ambiental mais preocupante, visto ser alimentada por carvão, enquanto que a instalada no Ribatejo possui tecnologia mais recente e é alimentada por gás natural. Tal é perceptível na quantidade de licenças de emissão atribuídas.

Em 2007, foram atribuídas à unidade de Sines licenças para a emissão de mais de 7,8 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (Figura 16). Para os anos seguintes, apesar de expectável uma ligeira redução dessa quantidade, Sines continuará a ser destacadamente a unidade mais relevante em termos de emissões de CO<sub>2</sub>.



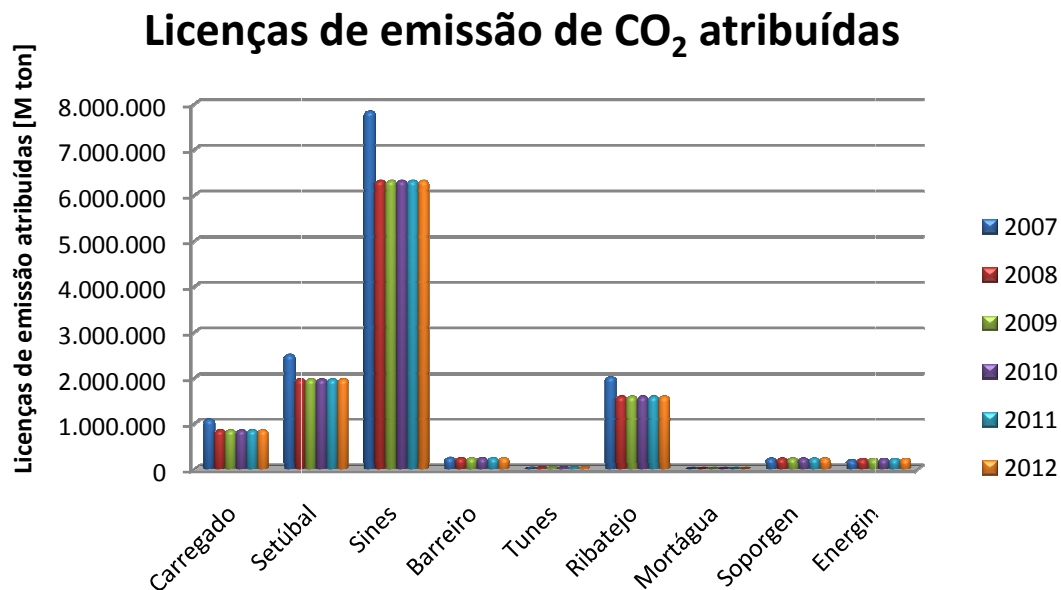


Figura 16 - Licenças de emissão de CO<sub>2</sub> atribuídas [EDP, 2007]

Assim, tendo em conta o panorama Nacional no que respeita a grandes fontes fixas, a unidade de Sines parece ser aquela com maior apetência para a aplicação da tecnologia de Sequestro de CO<sub>2</sub> em Portugal.

Nesse sentido, integrada na estratégia apresentada pela Comissão Europeia (CE), que visa reduzir até 2020 as emissões de GEE em 20 %, foi criada pelo Governo Português uma reserva em Sines de 800 MW, para a possível instalação de uma unidade de demonstração de tecnologias de carvão limpo com SAC (Portaria n.º 1074/2006 de 3 de Outubro).

A unidade termoelétrica de Sines fornece actualmente entre 20 e 25 % de toda a energia eléctrica produzida em Portugal. É uma central termoelétrica convencional constituída por 4 grupos que utiliza como combustível o carvão betuminoso. Após entrar na unidade, o carvão é transportado por tapetes rolantes para os moinhos onde é triturado e pulverizado. É posteriormente misturado com ar nos queimadores, onde é queimado. As cinzas volantes originadas no processo de queima são retiradas com desempoeiradores, evitando-se assim a sua saída pela chaminé e sendo rentabilizadas através da sua incorporação nas cimenteiras.

Para além do sistema de geração, esta unidade tem parques para carvão com capacidade de 1,5 milhões de toneladas, o que equivale a 5 meses de funcionamento da central em plena carga. O fornecimento deste carvão é favorecido pela localização da unidade, próxima do porto de Sines, de onde é feito este abastecimento.

Os actuais grupos geradores deste Centro de Produção foram instalados na década de 80 (entre 1985 e 1989) e, representando a tecnologia de então, alcança um rendimento próximo de 37%. Valor relativamente baixo quando comparado com outras unidades mais recentes.

A eficiência da actual unidade é a principal barreira à sua reconversão num sistema onde o CO<sub>2</sub> aí produzido possa ser capturado. Nesse cenário, a penalização energética seria dramática, a eficiência global reduziria para cerca de 26%, o que tornaria inviável economicamente o funcionamento da unidade [Mano, 2008].

A aplicação do SAC na unidade de Sines será apenas possível com uma profunda reconversão dos actuais sistemas de queima, ou com a construção de uma nova unidade, idealizada desde a sua concepção para o sequestro do CO<sub>2</sub>. Os modernos grupos com ciclos de vapor supercrítico ou ciclos combinados com eficiências de respectivamente 45% ou 60%, sem SAC, permitirão alcançar uma eficiência global superior a 36% com SAC, que, não sendo muito elevada, terá de ser aceite para que a utilização do carvão na produção eléctrica tenha emissões de CO<sub>2</sub> inferiores a 90% das actuais quantidades.

O grupo EDP (Energia de Portugal), em consonância com a vontade já demonstrada pelo Governo Português, tenciona incorporar a tecnologia de sequestro de CO<sub>2</sub> assim que essa esteja suficientemente desenvolvida e dê todas as garantias, situação que hoje ainda não acontece.

Acredita-se que a instalação da primeira unidade com sequestro de CO<sub>2</sub> aconteça a partir de 2020 [IPCC, 2005], até lá, espera-se a instalação de várias unidades piloto. Assim, tendo em conta os objectivos da EDP para esta tecnologia, será realista considerar que antes de 2030 não será expectável a existência de uma unidade equipada com sequestro de CO<sub>2</sub> em Portugal [Mano, 2008].

Com esse objectivo presente, e com vista ao desenvolvimento e acesso aos novos conhecimentos sobre a captura de CO<sub>2</sub>, a EDP Produção participa em dois projectos internacionais nos domínios da Pré-combustão e Pós-combustão, respectivamente Decarbit e Nanoglowa, e está ainda a preparar um novo projecto no âmbito da Oxi-combustão. [Mano, 2008]

Para além das questões técnicas, as questões financeiras serão fulcrais para a tomada de decisão de avançar com o SAC em Sines. Os enormes investimentos necessários para as unidades convencionais são ainda incrementados com os sistemas necessários ao sequestro do CO<sub>2</sub>, por outro lado, a penalização energética resultante do sequestro do CO<sub>2</sub> terá impacto no custo da energia produzida.

O valor estimado para o custo de uma nova unidade equipada com SAC, tem vindo a crescer significativamente, acompanhando os preços das matérias-primas e da energia [Mano, 2008]. Apesar do elevado grau de incerteza não se espera que esse valor seja inferior a 2000 €/kW de potência instalada [IPCC, 2005], representando a componente da captura cerca de 35% do investimento global.

Tendo por base estes valores, e considerando uma unidade equivalente à actual, de 1.000 MW de potência instalada, o investimento necessário será cerca de 2 mil milhões de euros.

Tabela 3 – Custos associados a novas unidades alimentadas a carvão [Katzner et al, 2007]

	PC Sub-crítica		PC Super-crítica		PC Oxi-combustível	IGCC	
	Sem sequestro	Com sequestro	Sem sequestro	Com sequestro	Com sequestro	Sem sequestro	Com sequestro
<b>Eficiência da unidade</b>	34,3%	25,1%	38,5%	29,3%	30,6%	38,4%	31,3%
<b>CO<sub>2</sub> emitido [g/kWh]</b>	931	127	830	109	104	832	102
<b>CUSTOS:</b>							
<b>Custos totais de uma unidade [\$ /kW]</b>	1280	2230	1330	2140	1900	1430	1890
<b>Operações e Manutenção [Cent/kWh]</b>	0,75	1,6	0,75	1,6	1,45	0,9	1,05
<b>Custo da electricidade [Cent/kWh]</b>	4,84	8,16	4,78	7,69	6,98	5,13	6,52
<b>Custo do CO<sub>2</sub> evitado vs. mesma tecnologia sem SAC [\$ /ton]</b>	41,3		40,4		30,3	19,9	

Na Tabela 3 apresentam-se os dados mais relevantes associados a diferentes tecnologias para novas unidades termoeléctricas a carvão assim como a comparação dessas com o respectivo sistema de sequestro de CO<sub>2</sub>. Para cada tipologia de unidades, são comparados parâmetros funcionais, como a eficiência e a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido, e também aspectos económicos. É comparado o investimento necessário, o custo da electricidade produzida e o custo do CO<sub>2</sub> evitado comparativamente com uma unidades equivalente que não efectue esse sequestro.

Centrais com combustão sub-crítica, conseguem operar a uma temperatura superior a 800 °C e altas pressões. Unidades super-críticas laboram com temperaturas ainda mais elevadas, o que lhes permite aumentar a sua eficiência.

As centrais com oxi-combustão incorporam um processo de funcionamento significativamente diferente das convencionais, mesmo das que trabalham com elevadas temperaturas, pelo facto de utilizarem O<sub>2</sub> em substituição do ar na promoção da combustão. Por sua vês, unidades IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) funcionam com ciclo combinado e prévia gaseificação do carvão. Não se dá a sua queima directa, é antes promovida a sua gaseificação, originando-se um gás síntese constituído maioritariamente por H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

No cenário de construção de uma nova unidade, a tecnologia de ciclo combinado e gaseificação do carvão parece ser a opção mais interessante. Sendo o objectivo o sequestro de CO<sub>2</sub>, esta opção apresenta não só custos de investimento ligeiramente inferiores às restantes, como possibilita a produção de energia a custos mais reduzidos. Uma vez que se estima que a instalação de uma nova unidade apontam para que tal não ocorrerá antes de 2030, é realista esperar que os actuais dados da tecnologia IGCC ainda evoluam de forma significativa, apoiando ainda mais esta opção. Sendo uma tecnologia relativamente recente, e ainda instalada em poucas unidades é esperada uma grande evolução. Espera-se que quando mais desenvolvida, (2020), esta tecnologia permita rendimentos de cerca de 57%. [Katzner, J. et al, 2007]

Após a combustão e o respectivo sequestro, é necessário armazenar o CO<sub>2</sub> de forma definitiva. O método economicamente mais interessante para este processo é sem dúvida a injeção do CO<sub>2</sub> em jazidas de gás ou petróleo com o objectivo de facilitar a sua extracção. Quando terminada a extracção quer de gás quer de petróleo, essas áreas são também propícias para o armazenamento do CO<sub>2</sub>. Não existindo actualmente no território nacional essas situações, outras opções terão de ser consideradas.

Áreas também propícias para o armazenamento de CO<sub>2</sub> são reservatórios salinos a grandes profundidades, estas são áreas arenosas preenchidas por água salgada que, estando isoladas por camadas de outras rochas, por exemplo xistosas, garantem o isolamento necessário. Em alguns países, como os Estados Unidos da América, o mapeamento destas regiões já existe. Em Portugal estima-se que existam zonas propícias, mas não existem os dados geológicos de camadas profundas que suportem essa ideia, só agora estão a ser dados os primeiros passos para a correcta identificação dessas áreas [Mano, 2008].

A empresa detentora da unidade de Sines (Energia de Portugal – EDP) como parte interessada nesse armazenamento está também a procurar a viabilização desta indispensável faceta da tecnologia, promovendo os estudos geológicos necessários.

Caso se revele infrutífero o estudo geológico ao território Nacional, outras alternativas terão de ser ponderadas. Nesse cenário, o CO<sub>2</sub> deverá ser transportado, por barco ou por gasodutos, para locais onde possa ser armazenado definitivamente. Este será sem dúvida a última opção pois é a que representa maiores gastos. Uma dessas opções será por exemplo a utilização dos campos de exploração de gás e petróleo na Argélia. Para tal seria necessário um transporte de cerca de 2000 km, o que representaria um custo de cerca de 20 dólares por cada tonelada de CO<sub>2</sub> transportado.

Outra possibilidade para o armazenamento do CO<sub>2</sub> poderá ser a sua colocação no oceano. Contudo esta via acarreta ainda muitas incertezas e impactos ambientais que se estimam maiores. Apesar da localização próxima do oceano, que privilegiaria esse como reservatório para o CO<sub>2</sub>, o armazenamento oceânico é actualmente o cenário menos provável.



## 6. Conclusão

O Sequestro e Armazenamento de CO<sub>2</sub> consiste num conjunto de processos que, não acarretando individualmente aspectos inovadores, encerram um elevado potencial no “combate” às alterações climáticas. Na realidade, quer o sequestro quer o armazenamento de CO<sub>2</sub> são processos recorrentes na indústria química e petrolífera respectivamente. A junção dos dois processos e a sua optimização é a grande evolução, visto que o SAC será nas próximas décadas um recurso fulcral na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

A análise da relevância desta tecnologia assenta em duas premissas. Por um lado, considera-se que o aquecimento global representa riscos para a existência da Humanidade como a conhecemos hoje, daí que os Governos terão políticas que promovam a resolução desse problema. Por outro lado, considera-se que os combustíveis fósseis continuarão a ter um papel muito relevante para a produção de energia nas próximas décadas.

Estima-se, portanto, que o SAC desempenhará um papel muito importante na segunda metade deste século e, num cenário optimista, na União Europeia, a partir de 2020, não será construída nenhuma central alimentada a combustíveis fósseis sem esta tecnologia incorporada [IPCC, 2005].

Antes desse período, porém, não é expectável que o SAC contribua para a minimização das emissões. As centrais a carvão que são hoje construídas são projectadas para laborar em média 40 anos, o que significa que irão manter as suas emissões ainda durante muitos anos. Apesar disso, a sua conversão para sistemas mais evoluídos, como o sequestro de CO<sub>2</sub>, é praticamente inviável. Em primeiro lugar, as centrais que apresentem uma eficiência baixa, 36% por exemplo, verão esse valor diminuído, consequência da perda de eficiência associada ao SAC. Em segundo lugar, a instalação



de sistemas de SAC implica grandes reestruturações e consequentemente grandes investimentos. Assim, estes aspectos são os grandes “defeitos” desta tecnologia.

Com os processos de SAC, serão obtidas capturas de CO<sub>2</sub> entre 85 e 95% [IPCC, 2005]. Esta captura implica, contudo, um gasto acrescido de energia que não existe nas unidades onde esta tecnologia não está instalada. Uma central eléctrica equipada com um sistema de SAC e com o respectivo armazenamento irá necessitar entre 10 e 40% mais de energia comparativamente com a mesma unidade sem sistema de SAC [IPCC, 2005].

No entanto, à medida que novas centrais eléctricas equipadas com SAC substituam centrais antigas e pouco eficientes, o balanço líquido em termos de energia gasta e produzida será compensado.

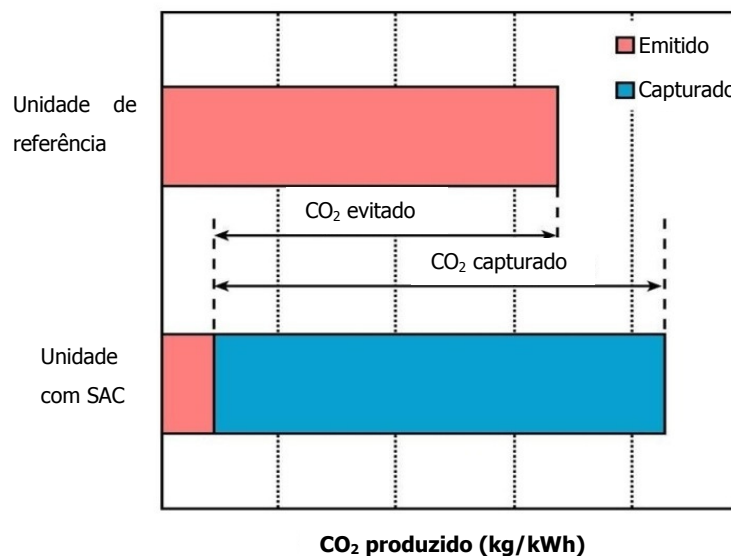


Figura 17 – Relação entre as emissões de CO<sub>2</sub> de uma unidade com e sem SAC [IPCC, 2005]

Como exemplificado na figura 17, uma unidade equipada com SAC irá consumir mais combustível para produzir a mesma quantidade de energia que uma unidade equivalente, mas sem o sistema de sequestro de CO<sub>2</sub>. Contudo, visto que cerca de 90% do CO<sub>2</sub> produzido é sequestrado, as emissões líquidas são claramente diferentes.

Esta penalização energética em unidades de queima de carvão representa um consumo energético entre 0,06 e 0,11 GJ/tCO<sub>2</sub> com sistemas de pós-combustão. Em

centrais de ciclo combinado alimentadas a gás natural, os valores variam entre 0,21 e 0,33 GJ/tCO<sub>2</sub>. Por sua vez, a posterior compressão do CO<sub>2</sub> removido até 110 bar exige cerca de 0,4 GJ/tCO<sub>2</sub> [Katzner *et al*, 2007].

O desenvolvimento de centrais mais eficientes em paralelo com a melhoria das técnicas de extracção de CO<sub>2</sub> dos efluentes gasosos será, deste modo, o caminho que esta tecnologia terá que percorrer de forma a ser totalmente incorporada em todas as situações possíveis, em especial nos projectos financeiramente mais limitados. Para contrariar estes factos, legislação eficaz e incentivos adequados serão críticos para se atingirem os objectivos propostos.

Porém, e apesar do conhecimento técnico existente, é fundamental a demonstração integrada e efectiva do Sequestro e Armazenamento de CO<sub>2</sub>, que, note-se, ainda não existe. Uma unidade alimentada a carvão com uma potência instalada de 500 MW emite cerca de 3 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente [Katzner, J. *et al*, 2007]. Todavia, o maior projecto de injeção de CO<sub>2</sub> actual, que está instalado no mar do Norte, tem capacidade de um milhão de toneladas por ano [IPCC, 2005].

Outro facto relevante é a necessidade de demonstração de uma unidade com SAC, alimentada a carvão, combustível para o qual a tecnologia apresenta um maior potencial.

Uma vez que os vários sistemas possíveis para o sequestro do CO<sub>2</sub> estão ainda em claro processo de evolução, não é possível apostar num deles como a tecnologia mais eficiente. Por outro lado, os vários sistemas terão desempenhos diferentes consoante o tipo de unidade e de combustível a que estão associados. Contudo, considerando a tecnologia disponível, a tecnologia IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*) é a que apresenta maior interesse relativamente à utilização do carvão.

Uma vez que a aplicação do Sequestro de CO<sub>2</sub> não foi ainda demonstrada com essa tecnologia, será crítica uma acção concertada entre entidades públicas e privadas, para que seja possível dar-se o próximo grande passo que será a sua demonstração em larga-escala a nível técnico, económico e ambiental de toda a tecnologia envolvida,

desde a captura até ao armazenamento. Repare-se que esta demonstração é vital para a aplicação da tecnologia de SAC à escala de Giga toneladas de CO<sub>2</sub>.

Não obstante todos os aspectos positivos, a tecnologia de SAC que se espera atingir para os próximos 50 anos, tem por base pressupostos que se podem considerar não condizentes com as premissas de desenvolvimento sustentável. Por um lado, o CO<sub>2</sub> armazenado exigirá uma contínua monitorização que, mais ou menos incisiva dependendo dos locais e das quantidades armazenadas, será necessária por largas centenas de anos. Além disso, existirá o risco de acidente nos locais de armazenamento, que estarão condicionados pelas características naturais de cada local. Um outro ponto que não abona a favor desta tecnologia é o facto de se manter a actual dependência dos combustíveis fósseis. Este facto tem, nas últimas décadas, dominado a economia mundial, tem sido motivo de guerras e é, naturalmente, fonte de poder. Visto que a grande maioria dos países considerados desenvolvidos não possuem fontes dessa energia, a economia mundial é cada vez mais dominada por políticas de um conjunto de países que tem o poder de gerir essas fontes de energia. Há que ter ainda em conta que a permanência do consumo de combustíveis fósseis acarretará também consequências negativas na sua exploração, ao nível da poluição atmosférica, poluição das águas e dos solos.

Apesar de todos os riscos, a realidade é que não fazer nada em relação à actual situação comporta riscos infinitamente maiores. Sendo o SAC uma tecnologia fundamental para garantir as crescentes necessidades energéticas da sociedade mundial, os factos acima descritos corroboram precisamente a necessidade do desenvolvimento paralelo e complementar de outras fontes de energia limpas.

A aplicação do SAC em Portugal aparenta ser propícia em Sines, onde existe uma unidade termoelétrica a laborar consumindo carvão, além de que existe também vontade política e da empresa que gere a actual unidade. Esta aplicação em Portugal é apenas possível com a construção de uma nova unidade, idealizada para a aplicação do SAC. Para se manter a actual capacidade produtiva em Sines, estima-se que esta nova unidade represente um investimento de cerca de 2 mil milhões de Euros.

De forma a armazenar em território Português o CO<sub>2</sub> aí sequestrado, são necessários vários estudos geológicos em profundidade que estão a ser iniciados. O cenário mais provável para o armazenamento do CO<sub>2</sub>, no caso de se concluir que não existe capacidade em Portugal, será o seu transporte para um país produtor de gás e petróleo, como a Argélia, por exemplo. Este transporte, de cerca de 2000 km, representa custos acrescidos a todo o processo que se estima em 20 dólares por cada tonelada transportada.

A aplicação desta tecnologia em Portugal tipifica uma importante fracção de unidades que se perfilam para receberem a tecnologia de sequestro de CO<sub>2</sub>. As unidades alimentadas a carvão são aquelas onde se prevê que a tecnologia de SAC tenha um maior impacto. Por um lado, as perdas de eficiência resultante da tecnologia de sequestro do CO<sub>2</sub> podem ser, em parte, compensadas com a utilização de tecnologia e processos mais evoluídos nos sistemas de queima do carvão. Por outro lado, o carvão é um recurso abundante e relativamente barato, que, com o SAC, tornará "limpo" este combustível, que apesar das vantagens conhecidas é hoje muitas vezes preterido devido aos impactos gerados pelas emissões do seu processo de queima.

Com esta nova tecnologia, o carvão continuará, pois, a ser uma fonte de energia barata e abundante, capaz de responder às futuras necessidades de consumo energético a nível mundial, sem com isso acarretar problemas ambientais como hoje acontece.



## 7. Bibliografia

- "Climate change and trace gases", May 2007, by James Hansen, Makiko Sato, Pushker Kharecha, Gary Russell, David W. Lea and Mark Siddall
- EDP, Relatório de Sustentabilidade 2007, nº de páginas: 116
- Ferreira, G. Victor; Pereira, C. Teresa; Seabra Tiago; Torres Pedro; Maciel Hugo; 2007, Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases 1990-2005, Instituto do Ambiente
- IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- Katzer, J.; Ansolabehere, S.; Beer, J.; Deutch, J.; Ellerman D.; Friedmann, J.; Herzog, H.; Jacoby, H.; Joskow, P.L.; Mcrae, G.; Lester, R.; Moniz, E.J.; Steinfeld, E.; [2007], The Future of Coal, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA
- Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Mano, A. (2008), comunicação pessoal
- Neves, F. C. Célia; Schwartzman M. Mendonça; 2005, "Separação de CO<sub>2</sub> por meio da tecnologia PSA"
- Specker Steven, 2007: Electricity Technology in a Carbon-Constrained Future  
[http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/Newsroom/EPRIUSElectSectorCO2Impacts\\_021507.pdf](http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/Newsroom/EPRIUSElectSectorCO2Impacts_021507.pdf))

**Sites consultados/ referidos:**

- URL 1 - APREN, Dados Gerais dos consumos eléctricos Nacionais  
<http://www.apren.pt/>
- URL 2 - World Coal Institute, Coal Facts 2007 Edition with 2006 data  
<http://www.worldcoal.org/pages/content/index.asp?PageID=188>
- URL 3 – <http://www.wikipedia.com>
- URL 4 -  
[http://www.columbusdispatch.com/live/content/science/stories/2007/11/06/sci\\_borehole.ART\\_ART\\_11-06-07\\_B4\\_NN8ARQL.html?print=yes&sid=101](http://www.columbusdispatch.com/live/content/science/stories/2007/11/06/sci_borehole.ART_ART_11-06-07_B4_NN8ARQL.html?print=yes&sid=101)
- URL 5 - ERSE, <http://www.erse.pt/NR/exeres/4D3CF6F1-19AA-411C-9DDE-10B59CA382BA,frameless.htm?print=y>
- URL 6 - Storing CO<sub>2</sub> Underground – IEA Greenhouse Gas R&D Programme  
<http://www.co2captureandstorage.info/>
- URL 7 - CO<sub>2</sub> Net, [www.co2net.com](http://www.co2net.com)

## 8. Anexos

- Portaria n.º 1074/2006 de 3 de Outubro